



Star Testing Astronomical Telescopes

A Manual for Optical
Evaluation and Adjustment

Harold Richard Suiter

Foreword by Richard Berry

Звездное тестирование

Астрономический

Телескопы

Руководство по оптической
оценке и настройке

Звездное тестирование

Астрономический Телескопы

Руководство по оптической
оценке и настройке

Гарольд Ричард Сьютер

Опубликовано:

Уиллманн-Белл, Инк.

П. О. Ящик 35025

Ричмонд, Вирджиния 23235

Соединенные Штаты Америки

Опубликовано Willmann Bell, Inc.

Почтовый ящик 35025, Ричмонд, Вирджиния 23235

Авторские права © Гарольд Ричард Сьютер, 1994–2001. Первое
английское издание, пятый тираж, май 2001 г.

Все права защищены. За исключением кратких отрывков, цитируемых в обзоре, никакая часть этой книги не может быть воспроизведена каким-либо механическим, фотографическим или электронным способом, а также не может быть сохранена в какой-либо системе поиска информации, передана или иным образом скопирована для публичного или частного использования без письменное разрешение издателя. Запросы на разрешение или дополнительную информацию следует направлять в отдел разрешений компании Willmann-Bell, Inc., PO Box 35025, Richmond, VA 23235.

Напечатано в Соединенных Штатах Америки.

Данные каталогизации публикаций Библиотеки Конгресса.

Сьютер, Гарольд Ричард.

Астрономические телескопы для испытания звезд: руководство для

Оптическая оценка и настройка / Гарольд Ричард Сьютер. - 1-е английское изд.

П. СМ.

Включает библиографические ссылки и указатель.

ISBN 943396-44-1

1. Телескопы -- Тестирование -- Руководства радиолюбителей.

I. Название.

QB88.S85

1994 г.

522'.2'0287 - DC20

94-30450

СИП

Предисловие

Написав эту книгу, Дик Сьютер создал важный ресурс для любительской астрономии. Эта книга поможет каждому производителю телескопов, каждому владельцу телескопа и каждому серьезному наблюдателю узнать, на что действительно способен хороший телескоп и как получать с помощью собственных телескопов наилучшие изображения. Если вы астроном-любитель, новичок или эксперт, эта книга важна, потому что она рассказывает вам, как максимально эффективно использовать свой телескоп.

Что делает звездный тест таким замечательным, так это то, что он одновременно очень простой и очень чувствительный. Звездный тест настолько прост, что вы, вероятно, уже используете его, даже если не совсем осознаете, что делаете это. Действительно, каждый раз, когда вы наблюдаете, каждый раз, когда вы смотрите в телескоп, вы видите, как звездный свет объединяется, образуя звездное изображение. Эта книга научит вас объективно и осмысленно интерпретировать то, что вы видите.

Чтобы выполнить звездный тест, вы просто наблюдаете за звездой в окуляр среднего увеличения, внимательно рассматривая изображение по обе стороны от фокуса. Узоры, которые вы видите на сфокусированных и расфокусированных изображениях звезд, подскажут вам, настроен ли ваш телескоп на максимальную производительность, стабильна ли атмосфера и когда телескоп остыл и готов работать наилучшим образом. Звездный тест занимает всего лишь минуту, и, поскольку он очень полезен, звездный тест становится нормальной частью вашей рутины наблюдений.

Впервые я переписывался с Диком Сьютером более дюжины лет назад, когда связался с ним по поводу короткой статьи о звездном тестировании, которая в конечном итоге была опубликована в журнале *Астрономия*. С тех пор он постоянно поражал меня своей способностью сочетать сложную теорию с практическим изготовлением телескопов. Книга, которую вы сейчас держите в руках, не является исключением: Дик объединил сложное компьютерное моделирование с практичными советами, которые вы можете использовать, чтобы больше узнать о своем телескопе. Сотни созданных им иллюстраций позволяют распознать весь спектр факторов, которые могут повлиять на работу телескопа. Поэтому эта книга представляет собой сложную работу в форме, понятной каждому.

Чтобы дать вам представление о том, как звездное тестирование может вам помочь, позвольте мне описать, как я использовал звездное тестирование, чтобы добиться первоклассной производительности от моего первого большого проекта.

телескоп, 20-дюймовый f/5 с монтировкой Добсона. В то время, когда я его создавал, добsonianцы были довольно новыми, и вся опубликованная тогда информация о создании этих больших альт-аз-инструментов едва могла бы заполнить брошюру. Я сделал все больше, толще и прочнее, чем необходимо. Хотя светочувствительность моего недавно построенного телескопа была, конечно, изумительной, изображения звезд часто были нечеткими, пока слишком тяжелая конструкция не остыла.

В первый год, когда я пользовался телескопом, я регулярно проверял звезды и по воздушным потокам, которые я видел на внефокальных изображениях, пришел к выводу, что и зеркало, и трубка охлаждались слишком медленно, и что зеркало охлаждалось медленнее, чем трубка. Я установил вентилятор за зеркалом, чтобы нагнетать воздух через трубку и над зеркалом. Это сработало чудесно! Поскольку воздушные потоки значительно уменьшились, тестирование звезд теперь выявило некоторую сферическую aberrацию, хотя ее едва ли достаточно, чтобы помешать большинству наблюдений глубокого космоса. Я некоторое время спорил, заслуживает ли эта проблема внимания, и в конечном итоге решил переосмыслить ее.

Результат меня очень порадовал. Благодаря охлаждающему вентилятору и почти идеальному зеркалу мой большой Доб теперь давал превосходные изображения Луны и планет. Он превосходил точные апохроматы в предоставлении четких и ярких изображений Сатурна и Юпитера (хотя, честно говоря, апохроматы были меньше). Во время противостояния Марса в 1988 году я не только впервые увидел Деймос и Фобос, но и наслаждался лучшими видами самой планеты, которые мне когда-либо открывались. Тщательное звездное тестирование показало, что иногда оптика слегка пережималась. Я связал проблему с ячейкой зеркала и обнаружил, что если встряхнуть телескоп, зеркало осядет в ячейке и выдающиеся изображения восстановятся.

Вы тоже получите пользу, когда станете чувствительны к оптическим характеристикам вашего телескопа. Если вы обнаружите, что у вашего телескопа есть некоторые проблемы (а у какого телескопа их нет?), лучше всего открыто решить их. Потенциальные астрономы, которые отказываются признать такие проблемы, как правило, перестают пользоваться своими телескопами и в конечном итоге теряют интерес к астрономии. Как только вы обнаружите, что проблема существует, вы можете использовать звездный тест, чтобы исправить ее. Часто нет ничего такого, чего не могла бы решить тщательная коллимация. Если ваш телескоп правильно настроен и имеет отличную оптику, звездный тест подтвердит этот факт, и вы сможете обратить свое внимание на другие вопросы наблюдений.

Нечасто одна-единственная книга способна открыть глаза целому поколению астрономов-любителей. Я верю Суйтеру *Астрономические телескопы для тестирования звезд* это такая книга. Это увеличит удовольствие от наблюдений каждого астронома-любителя, который прочитает и примет эту книгу близко к сердцу.

Ричард Берри
Лайонс, Орегон

Оглавление

Предисловие	III
Знакомство с автором	xi
Предисловие	xiii
1 Введение	1
1.1 Оценка телескопа	1
1.2 Тестирование поверхностей	2
1.2.1 Источники ошибок.....	4
1.2.2 Меры оптического качества	6
1.3 Звездный тест – краткий обзор	9
1.3.1 Дифракционные кольца	10
1.4 Причина звездного тестирования.....	14
2 Сокращенное руководство по Star-Test	17
2.1 Некоторые необходимые предварительные сведения.....	17
2.2 Оптические проблемы в свою очередь.....	18
2.2.1 Вторичное зеркальное препятствие	20
2.2.2 Несоосность	22
2.2.3 Атмосферное движение и турбулентность.....	23
2.2.4 Токи трубки.....	24
2.2.5 Зажатая или деформированная оптика.....	25
2.2.6 Сферическая аберрация	26
2.2.7 Шероховатые поверхности	28
2.2.8 Зональные аберрации	31
2.2.9 Загнутые края	31
2.2.10 Астигматизм.....	32
2.3 Заключительные замечания.....	33

3	Телескопы — это фильтры	35
3.1	Восприятие реальности.....	37
3.2	Сравнение с аудио.....	38
3.2.1	Диаметр апертуры/размер динамиков.....	39
3.2.2	Цветные фильтры/фильтры эквалайзера.....	41
3.2.3	Обработка изображений/обработка сигналов.....	41
3.2.4	Рассеянный свет/звуковой шум.....	43
3.2.5	Пространственные частотные/аудиочастотные характеристики.....	45
3.3	Функция передачи модуляции (МТФ).....	46
3.4	Использование МТФ	49
3.4.1	МТФ, связанный с дефокусировкой	51
3.4.2	Укладка МТФ	52
4	Дифракция	55
4.1.	Координаты света	57
4.2	Последствия фильтрации.....	61
4.3	Волны возрождаются.....	63
4.3.1	Дифракция и фокусировка	65
4.3.2	Зоны Френеля.....	66
4.3.3	Зоны Френеля с расфокусировкой	68
4.4	Узлы и пучности.....	70
4.5	Другие аберрации — функция зрачка.....	74
5	Проведение звездного теста	77
5.1	Расфокусировка и чувствительность.....	78
5.1.1	Движение фокусера, связанное с аберрацией дефокусировки.....	78
5.1.2	Чувствительность звездного теста.....	81
5.2	Искусственные источники.....	82
5.2.1	Расстояние до искусственных источников.....	83
5.2.2	Диаметр искусственных источников.....	86
5.2.3	Использование отражающей сферы вместо точечного отверстия.....	88
5.2.4	Установка ночного искусственного источника	90
5.3	Проведение теста	91
5.3.1	8-дюймовый рефлектор Ньютона $f/6$	94
5.3.2	16-дюймовый объектив Добсона с диафрагмой $f/4$ и ньютоновским объективом	97
5.3.3	6-дюймовый апохроматический рефрактор $f/12$	98
5.3.4	8-дюймовый катадиоптрический объектив Шмидта-Кассегрена $f/10$	100
6	Несоосность	103
6.1	Кинематический вид центровки	103
6.2	Последствия несоосности	104
6.3.	Аберрационная функция смещенного ньютоновского закона	106

6.4. Фильтрация смещенного ньютоновского закона.....	107
6.5 Юстировка трех телескопов.....	108
6.5.1 Рефлектор Ньютона.....	109
6.5.2 Рефрактор.....	121
6.5.3 Шмидт-Кассегрен.....	125
7 Воздушная турбулентность и трубные токи	129
7.1 Воздух как преломляющая среда.....	129
7.2 Турбулентность	130
7.2.1 Функция аберрации	131
7.2.2 Фильтрация, вызванная турбулентностью	136
7.2.3 Наблюдение турбулентности	136
7.2.4 Корректирующие действия	138
7.3 Токи трубки	139
7.3.1 Функция аберрации	139
7.3.2 Фильтрация ламповых токов	140
7.3.3 Наблюдение токов в трубке	142
7.3.4 Корректирующие действия в отношении токов трубки	143
8 Защемленная и деформированная оптика	145
8.1 Причины.....	145
8.2 Функция аберрации	147
8.3. Фильтрация защемленной оптики.....	147
8.4. Дифракционные картины защемленной оптики.....	148
8.5 Устранение проблемы.....	150
9 Препятствие и затенение	153
9.1 Центральное препятствие.....	153
9.2 Спайдер-дифракция.....	157
9.3 Затенение или аподизация.....	160
9.4 Пыль и царапины на оптике.....	166
10 Сферическая аберрация	169
10.1 Что такое сферическая аберрация?	170
10.2 Космический телескоп «Хаббл».....	172
10.3 Генерализованная сферическая аберрация.....	173
10.4 Аберрационные функции.....	174
10.5 Ошибка коррекции (сферическая аберрация низшего порядка).....	176
10.5.1 Фильтрация сферической аберрации	176
10.5.2 Звездные шаблоны ошибок коррекции	178
10.5.3 Оценка серьезности проблемы.....	179
10.6 Тестирование на коррекцию.....	191

10.7 Сферическая aberrация высшего порядка.....	192
10.7.1 Звездные тесты сферических aberrаций высшего порядка.....	Фильтрация 194
10.7.2 сферических aberrаций высшего порядка.....	194
10.8 Компактный, единый стандарт оптического качества.....	196
10.9 Допустимые ошибки	198
11 Круглых зон и закругленные края	201
11.1 Причины зональных дефектов	201
11.2 Внутренние зоны	204
11.2.1 Абберационная функция S-зон.....	205
11.2.2 Фильтрация S-зон	205
11.2.3 Обнаружение внутренних зон при тесте «Звезда».....	207
11.3 Заточенные края	209
11.3.1 Функция aberrации.....	211
11.3.2 MTF поворотной кромки	211
11.3.3 Образец изображения загнутой кромки	211
11.3.4 Отношение сигнал/шум загнутой кромки.....	215
11.3.5 Ширина заточенной кромки.....	216
11.3.6 Способы устранения загнутой кромки	217
12 Хроматическая aberrация	219
12.1 Дисперсия.....	220
12.2 Ахроматическая линза.....	222
12.3 Остаточная хроматическая aberrация.....	224
12.4 Апохромат.....	226
12.5 Проверка рефракторов на наличие других aberrаций.....	227
12.6 Звездный тест на хроматические эффекты.....	227
12.6.1 Клинь, ошибки сборки и атмосферные спектры.....	228
12.6.2 Звездный тест для обычных астрономических Визуальные дублеты	229
12.6.3 Звездный тест апохроматов или усовершенствованных рефракторов.....	231
12.6.4 Хроматические эффекты в глазах.....	232
12.6.5 Окуляр	232
12.7 Выводы и средства правовой защиты	232
13 Шероховатость	235
13.1 Шкалы и эффекты шероховатости	236
13.2 Терминология шероховатости	238
13.3 Среднемасштабная шероховатость, или первичная пульсация.....	239
13.3.1 Абберационная функция среднемасштабной шероховатости...	241
13.3.2 Эффекты фильтрации среднемасштабной шероховатости.....	242

13.3.3 Звездообразный тест на шероховатость средней величины.....	243
13.3.4 Шероховатость и турбулентность	243
13.4 Мелкомасштабная шероховатость, или микрорябь.....	246
13.4.1 Аберрационная функция мелкомасштабной шероховатости.....	247
13.4.2 Фильтрация мелкомасштабной шероховатости.....	247
13.4.3 Великое Неизвестное.....	248
14 Астигматизм	251
14.1 Астигматизм в глазах и оптике телескопа.....	251
14.2 Причины астигматизма	253
14.3 Аберрационная функция астигматизма	254
14.4 Фильтрация астигматизма.....	256
14.5 Звездные тестовые шаблоны.....	258
14.6 Идентификация в ньютоновских отражателях.....	258
14.7 Рефракторы или Шмидта-Кассегрена.....	263
14.8 Средства правовой защиты	264
15 накопленных оптических проблем	265
15.1 Сломать спину верблюду.....	265
15.2 Крепление телескопа.....	269
15.3 Ошибки на стекле	272
15.4 Тестирование других телескопов.....	273
15.5 Когда все идет хорошо	274
Другие тесты	277
Ал Тест Фуко.....	Тест 278
А.2 Хартмана.....	284
А.3 Разрешение двойных	286
А.4 звезд.....	Геометрический тест 289
А.5 Ронки.....	Интерферометрия 298
А.5.1 Как работают интерферометры?	298
А.5.2 Точечный дифракционный интерферометр.....	302
А.6 Нулевой тест.....	304
Б Методы расчета	307
Бл Понятия дифракции.....	307
БИ 2Приближения Фраунгофера и Френеля.....	310
Б.3 Расчеты изображения для симметричных апертур	312
Б.4 Расчеты изображений для несимметричных апертур	314
Б.5 Программы	Б.5.1 316
Симметричная функция зрачка.....	Асимметричная 316
Б.5.2 функция зрачка.....	317

Икс

Б.6	Верификация численной процедуры	317
в.6.1	Сравнение APERTURE и ASYMM..... Численное	318
Б.6.2	сравнение с аналитическим решением. Сравнение	318
Б.6.3	с опубликованными шаблонами.	320
Б.7	Числовые ограничения программ	320
Б.8	Трудности печати	324
С	Вывод вспомогательной оси и смещения	327
кл.	Вывод	327
С.2	Прецедент.....	330
С.3	Приближения	330
D	Маркировка дифракционных картин	333
Е	Ход окуляра и аберрация дефокусировки	337
Ф	Блеск в блестящей сфере	339
G	Список общих символов	341
	Глоссарий	343
	Библиография	353
	Индекс	359

Знакомство с автором

Я никогда не забуду свою первую встречу с Диком Сьютером. Я построил свой первый телескоп, 8-дюймовый ньютоновский телескоп на монтажке Добсона, за одни выходные. Оптика не была образцом искусства мастера. Пару раз я терял отверстие для фокусера и закрывал свои ошибки кусками картона. Телескоп был случайно покрашен какой-то небесно-голубой краской, которая несколько лет томилась в моем гараже.

Мои первые попытки использовать телескоп на заднем дворе оказались безуспешными. Я не смог найти с его помощью никаких реальных астрономических объектов и собирался отказаться от астрономии как от хобби.

Друг предложил мне посетить обсерваторию Перкинса со своим телескопом. Он слышал, что члены местного астрономического клуба, Астрономического общества Колумбуса, установили свои маленькие телескопы в тени гигантского купола обсерватории. В ту ночь поле наблюдения усеяло около дюжины телескопов. Среди группы был Дик Сьютер, заслуживший репутацию местного эксперта по оптике телескопов. Надеюсь, что все мои проблемы с наблюдениями могут быть связаны с плохой оптикой, я попросил Дика проверить мой телескоп.

Он посветил красным фонариком на синюю краску. «На это особо не на что смотреть», — сказал я, смущенный плохим качеством изготовления.

Он повернул прицел на крепление. «Не имеет значения. Работает нормально», — сказал он. Он научил меня настраивать телескоп и направил его на яркую звезду. Он посмотрел в окуляр и начал медленно вдвигать и выдвигать его. Спустя время, которое мне показалось вечностью (на самом деле это было всего несколько минут), он, наконец, вынес суждение: «Немного перекорректировано, слегка шероховатая поверхность. Хороший край. Сойдёт».

«Как он может все это сказать, просто взглянув?» — подумал я, когда он направил телескоп на туманность Кольцо в Лире. Весь дальнейший скептицизм был смыт великолепием вида.

Месяц спустя я использовал звездный тест, чтобы оценить телескопы других людей. Это так просто научиться. За прошедшие годы я построил 50 телескопов, все типа Добсона, и протестировал каждый из них, чтобы оценить

оптика.

Весь этот опыт научил меня ценить звездный тест. Другие тесты слишком сложны для новичка или требуют специального оборудования. Я всегда хотел построить тестер Фуко, но в этом не было никакого смысла. Другие крайне нечувствительны к тонким проблемам, присущим некоторым зеркалам телескопов. (Я видел, как некоторые действительно ужасные зеркала «проходили» тест Рончи.) Звездный тест — это все, что мне когда-либо было нужно.

Дик — последний человек, который скажет, что звездное тестирование — единственный полезный тест зеркала. Например, он не предоставляет количественных данных, необходимых на ранних этапах построения зеркала. Однако он чрезвычайно полезен на заключительных стадиях, когда внимательный изготовитель зеркал ищет визуальное подтверждение данных Фуко.

Когда наша группа работала над 16-дюймовым зеркалом Астрономического общества Колумбуса, мы получили зеркало настолько хорошо, насколько это возможно, с помощью теста Фуко. Затем, ночь за ночью, Дик устанавливал оптику на импровизированном креплении на моем заднем дворе. С рюмками и бесконечным терпением Дик сделал несколько проходов полировальным инструментом, проверил его и сделал еще несколько проходов. В результате получилось лучшее зеркало любительской работы, которое я когда-либо использовал. (За виды поясов облаков Юпитера стоит умереть.) Окончательная фигура зеркала была проверена в телескоп под звездами. И так и должно быть.

Самой большой проблемой звездного теста всегда было отсутствие простых и широко доступных инструкций о том, как проводить тест, а также четко сформулированных аргументов в пользу его преимуществ перед другими методами оценки.

Вы держите в своих руках эти инструкции и этот аргумент. Я думаю, что некоторые из вас, кто убежден, что другие методы тестирования превосходят другие, будут впечатлены ясными и неопровержимыми аргументами Дика в пользу чувствительности и полезности звездного теста. Звездный тест предлагает уникальное сочетание простоты, элегантности и мощности.

Практически каждый астроном-любитель, которого я знаю, учился звездному тесту у Дика или от кого-то, кто учился этому у него. Благодаря этой работе терпение и талант Дика к объяснению техники привлекут более широкую аудиторию, которую они заслуживают.

Самый важный урок, который Дик преподавал мне той ночью в обсерватории Перкинса, заключался в том, что хороший набор оптики, хорошо установленной и превосходно настроенной, является дверью в бесконечные миры. Когда звездное тестирование было завершено, Дик и его друзья показали мне десятки звездных скоплений, туманностей и галактик в моем самодельном приборе с загнутыми уголками. Моя жизнь изменилась той ночью так давно. Я надеюсь, что и ваше оживят таким же образом — с помощью прекрасного телескопа, направленного вверх, на звезды.

Том Бернс, директор
Обсерватория Перкинса

Предисловие

Эта книга посвящена одному из методов проверки оптического качества телескопов. Он носит неофициальное название «звездный тест», хотя, вероятно, его точнее было бы назвать тестированием «точечного источника». Причина, по которой звезды используются в качестве тестовых объектов, заключается не в том, что их так много, а в том, что звезды кажутся бесконечно маленькими. Таким образом, они действуют как истинные точки. Задача телескопа в этом случае — сопоставить одну точку далекого космоса с одной точкой изображения. Сведя сложность получения изображений к этой минимальной задаче, мы имеем некоторую надежду выяснить, почему телескоп терпит неудачу или добивается успеха.

Тест точечного источника впервые был использован при изготовлении телескопа в 1722 году, когда Джон Хэдли использовал его для изготовления самого раннего астрономического ньютоновского рефлектора. Хэдли применил вариант звездного теста, поскольку его источником была близлежащая точечная дыра, но при этом были использованы все основные элементы звездного теста. Он подвел окуляр к обеим сторонам изображения и оценил поведение света в фокусе по тому, что он видел с каждой стороны (Кинг, 1955).

Однако звездчатый тест никогда не пользовался популярностью как единственный метод тестирования во время производства. Даже после примера Хэдли предпочтение отдавалось другим тестам. Звездный тест обычно не позволяет получить профили поверхности и не является удобным методом оценки в помещении. Это не означает, что у его использования при создании телескопов не было нескольких ярых сторонников, но самой популярной функцией звездного теста является окончательная оценка готового работающего телескопа.

Математический расчет внешнего вида изображения возможен, но это не значит, что это легко. Дифракционные расчеты, хотя концептуально просты, почти неразрешимы в вычислительном отношении. Лишь несколько канонических примеров были рассчитаны с использованием аналитических (т. е. «бумажно-карандашных») методов. Дифракции пришлось ждать появления современного электронного компьютера, прежде чем вопросы, представляющие общий интерес для пользователей телескопов, были решены любым, кроме самого выносливого и настойчивого оптического теоретика.

Эта трудность объясняет сравнительную редкость хороших инструкций по просмотру различных аберраций. Каждая позиция расфокусировки требует отдельного длительного расчета. Неудивительно, что до появления компьютерных технологий дифракционные картины, возникающие в результате аберраций, редко рассчитывались.

машины.

Вместо этого наблюдатели на протяжении целого столетия полагались на энциклопедический опыт и навыки рисования одного человека, Х. Денниса Тейлора. В 1891 году он опубликовал крошечную книжку с набором рисунков звездных испытаний, воспроизведенных графически и вклеенных на фронтиспис (Taylor 1983). С тех пор эти рисунки много раз переиздавались, а описания Тейлора были обобщены в ряде книг (например, Twyman 1988, Bell 1922 и Ingalls 1976).

Маленькая книга Тейлора в значительной степени ориентирована на рефракторы, которые доминировали в астрономическом сообществе его времени. Он не касается проблем, чаще возникающих в отражателях, таких как препятствия и загнутая кромка. Таким образом, рисунки Тейлора побудили наблюдателей жаждать большего. Помимо прочего, эта книга представляет собой попытку модернизировать и расширить описания звездных испытаний Тейлора. Он заполняет большую часть характеристик рефлектора, которым не уделялось внимания в его плодотворной работе.

За столетие, прошедшее с момента публикации книги Тейлора, было выпущено несколько работ, посвященных исключительно звездному тесту. WT Welford (1978) опубликовал обзорную статью, в которой суммировал скудную литературу по этой технике. Ему снова пришлось прибегнуть к словесным описаниям, поскольку он не владел методом графической передачи сложных изображений звезд.

Одним из факторов, способствующих созданию этой книги, является язык компьютерной графики. Рассчитанные здесь дифракционные изображения составлены на языке PostScript компанией Adobe Systems, Incorporated. PostScript позволяет рассчитать яркость пикселя и разместить его на изображении в точном месте. Ни одна дифракционная фигура в этой книге не была нарисована вручную и не представляет собой ошибочную попытку ретуши.

Это утверждение не означает, что изображения, представленные в этой книге, идеальны. У них есть мои предпочтения по контрасту и неизбежные ошибки выборки, а также недостатки, связанные с незнанием того, что будет напечатано на последней странице. По крайней мере, все ошибки *равномерно* применяются к каждому пикселю кадров. Рассчитанные изображения в этой книге настолько близки к оптической точности, насколько мы с издателем можем их сделать. Цель всего этого — убедить вас в том, что эти изображения подлинны, если не подлинны.

Учитывая акцент на графике, книга также напечатана на дорогой глянцевой бумаге. Этот тип бумаги обычно используется для фотопластинок и обычно используется только для нескольких листов. Здесь используется глянцевая бумага, потому что она предлагает великолепно широкий динамический диапазон. Эта бумага очень плотная и упаковывается плотнее, чем обычная книжная бумага. Как следствие, этот том на первый взгляд тоньше, чем можно было бы предположить из его 380 с лишним страниц. Надеюсь, эта компактность позволит и испытателям перевозить

¹ В более поздних изданиях этой таблички нет. Они воспроизводят фотографию на распечатанной странице.

книгу, чтобы наблюдать за сайтами с большей легкостью, чем в противном случае.

Эта книга написана для астрономов-любителей, пользующихся телескопами малых и средних размеров (апертура менее 20 дюймов или около того). Книга может иногда быть полезна профессиональным астрономам и специалистам по оптике, хотя первым обычно приходится иметь дело с особенностями изображений огромных телескопов, а у вторых, возможно, уже сформировались различные мнения по многим темам. Когда я стоял перед выбором между строгостью и ясностью изложения, я почти всегда выбирал ясность. Таким образом, книга больше напоминает личную точку зрения, чем авторитетный документ.

Я постарался оставить менее поучительные аспекты теории дифракции Гюйгенса-Френеля в конце книги. Однако я не хотел полностью их выбрасывать. В противном случае большая часть книги напоминала бы холодное утверждение, заставляющее читателя верить или не верить мне. Я также не хотел полностью удалять уравнения из центрального обсуждения, но стараюсь ограничить их освещением важных тем. Читателю не обязательно понимать математику в тексте, чтобы эффективно использовать звездный тест, но наиболее полное понимание причин и следствий вознаградит тех, кто изучил эти обсуждения. Приложение Б предназначено только для тех, кто желает подробно узнать, как были созданы эти сложные фигуры. Это ни в коем случае не «обязательно». Приложение D, с другой стороны, полезно для случайных читателей, поскольку оно содержит описание маркировки цифр звездных испытаний. Это объясняет, каким образом я «сложил» фокальную область так, чтобы она поместилась на печатной странице. Обязательно проконсультируйтесь с ним, когда наконец встретите эти цифры.

Некоторые могут обвинить меня в том, что я пытаюсь разжечь огонь среди производителей, но это не входит в мои намерения. Моя мотивация почти обратная. Слишком долго производители были вынуждены производить некачественную оптику для телескопов, потому что их клиенты покупают телескопы так же, как они покупают мешок картошки – основываясь только на цене. Если покупатели не могут определить качество оптики, единственными критериями при принятии решения становятся другие, менее важные факторы (например, цена). Я передаю в руки клиентов надежный метод тестирования. Звездный тест позволит им определить, что бренд Б, который стоит немного дороже, является *действительно лучшим продуктом* бренда А. Производители могут вернуться – без сомнения, с некоторым облегчением – к производству качественной оптики, и их клиенты смогут заметить разницу.

Я хотел бы поблагодарить множество людей, которые помогли мне с этой книгой. Я не могу перечислить их всех здесь, но я хотел бы особо отметить следующие вклады:

Бобу Бунге, Питеру Чераволо и Бобу Генту за любезное предоставление мне различных рекомендаций.

Рэю Лиму за поиск опечаток в сложных математических задачах.

ические приложения.

Э. Вольфу и Р. Кингслейку за то, что они приложили все усилия, чтобы помочь мне получить разрешение на перепечатку одного из рисунков в Приложении В.

Опытный мастер зеркал Билл Герберт за тестовые фотографии Фуко и Рончи.

Редактору Тому Бёрнсу за преобразование моих блужданий в достаточно связный английский язык.

Дайане Лукас, Ричарду Берри, Майклу Брунну, Ричарду Бухредеру, Роджеру Синнотту и Биллу Змеку за незавидную работу по подробному техническому чтению моей рукописи.

Благодаря этим людям книга стала точнее и гораздо понятнее. (Конечно, все оставшиеся ошибки — это исключительно моя вина.)

ЧРС
Панама-Сити, Флорида
апрель 1994 г.

Глава 1

Введение

1.1 Оценка телескопа

Я расскажу вам малоизвестный факт. Телескопы легко проверить. Все, что потребуется, — это хороший окуляр с большим увеличением, удобно расположенная звезда или подсвеченная обскура и некоторый опыт. На самом деле телескопы настолько легко проверить, что я рекомендую вам проверить оптическую систему вашего телескопа *каждый раз, когда вы его используете*, в качестве монитора выравнивания, правильной оптической поддержки и атмосферных условий.

Вы заметите, что методы, предложенные в этой книге, сильно отличаются от методов, используемых производителями телескопов. Телескоп *изготовление*, в отличие от телескопа *оценка*, требует указания корректирующих мер. Следовательно, производители телескопов отдают предпочтение методам, которые приводят к профилю оптических поверхностей или, по крайней мере, к ошибкам в наклоне этих поверхностей. Они могут использовать эту информацию, чтобы решить, где им следует удалить небольшое количество стекла на следующем этапе расчета.

Такие методы требуют специального оборудования и, что более важно, требуют навыков, которые лучше всего приобретать под руководством эксперта. Испытания в оптических цехах, как правило, требуют деликатной визуальной интерпретации, и обычно кому-то приходится физически продемонстрировать испытание человеку, с ним незнакомому.

С другой стороны, оценка телескопа — это проверка готового продукта. Для этого не требуется или практически не требуется специального оборудования. Оценщика мало волнует, как можно улучшить оптическую деталь. Тест представляет собой чисто ответ «да-нет»: достаточно ли хорош оптический поезд для передачи изображения или нет? Оценка включает в себя *весь* оптический путь, даже тех элементов, которые обычно не включаются в телескоп, от верхних слоев атмосферы до глаза наблюдателя.

Звездный тест оценивает телескопы в их окончательной конфигурации, делая именно то, для чего они были предназначены. Звездный тест нелегко уменьшить

к цифрам, но он очень чувствителен. Телескоп, «прошедший» звездный тест, не нуждается в стендовых испытаниях. Он уже соответствует самым строгим критериям, необходимым для создания красивых изображений.

Звездный тест — это исследование изображения точечного источника, чаще всего звезды, как в фокусе, так и по обе стороны от фокуса. Сила звездного теста заключается в этом простом движении окуляра для изучения расширенного дифракционного диска по обе стороны от фокуса. Расширенное пятно не только больше и, следовательно, его легче увидеть (сфокусированные дифракционные диски большинства астрономических телескопов крошечные), но и «разворачивается» в уникальное представление аберраций, которые его вызвали. В частности, расфокусированное круглое изображение выглядит одинаково на одинаково малых расстояниях внутри и снаружи фокусной точки. *но только если оптика отличная.*¹

Расширенные диски будут выглядеть по-другому, если какая-либо аберрация ухудшает работу системы. Чувствительность этого теста феноменальна. Моим первым зеркалом был рефлектор диаметром 200 мм с диафрагмой $f/6$, который регулярно дает превосходные изображения планет, но все же едва выдерживает звездный тест. Он демонстрирует некоторую склонность к чрезмерной коррекции, шероховатостям и загнутым краям.

Телескоп автоматически готовится к звездному тесту, и тест проводится со всеми установленными оптическими элементами. Многие из оптических дефектов, обсуждаемых в этой книге, не имеют ничего общего с ошибками стекла и даже не были бы обнаружены при заводских испытаниях во время изготовления. Например, упомянутый выше 200-миллиметровый рефлектор аккуратно удерживается на 9-точечной опоре для зеркала и все же имеет некоторые незначительные признаки того, что зеркало провисает в своей ячейке.

Вы начнете полагаться на звездный тест как на проверку мировоззрения. Быстрое включение фокусера — это все, что нужно, чтобы убедиться, что смещение не мешает вашим изображениям. Чтобы увидеть, что происходит в верхних слоях атмосферы, вам придется полагаться на появление внефокусных изображений. Когда хорошие наблюдения приходят и уходят, вы можете изменить график вечерних наблюдений, чтобы насладиться превосходным спокойствием.

1.2 Тестирование поверхностей

Вы можете справедливо подозревать, что телескопы изготовить непросто. Объектив или основной оптический элемент астрономического телескопа содержит наиболее точные макроскопические твердые поверхности, когда-либо созданные человеком. Типичный

¹На этом этапе следует определиться с терминологией, чтобы избежать последующей путаницы. В дальнейшем обсуждении говорят, что изображение «не в фокусе», если оно расфокусировано *вдлинна* направление. «Внутренний фокус» означает, что фокальная плоскость окуляра расположена между основным оптическим элементом и фокусом; «вне фокуса» означает, что окуляр выведен за пределы фокуса. «В фокусе» и «сфокусированный» используются как синонимы, означающие, что точечный объект сфокусирован до минимального размера.

допуски в тысячу раз меньше обычной точности токарного станка.

Для сравнения давайте представим, что поверхность обычного зеркала телескопа диаметром 200 мм (8 дюймов) увеличена до 1 мили (1,6 км). Если бы это зеркало имело обычное соотношение толщины маленьких зеркал, его толщина была бы 880 футов (268 м). В обычной слесарной практике такая 8-дюймовая поверхность обычно обрабатывается с точностью до тысячной доли дюйма или с точностью до 8 дюймов. В этом масштабе длина волны света увеличивается с 0,000022 дюйма до 0,17 дюйма (4,4 мм). Максимальная оптическая погрешность, допустимая на такой поверхности, составит всего 0,55 мм или около $2/100$ дюйма. Оптика премиум-класса будет изготовлена с точностью менее 0,01 дюйма (0,25 мм) — погрешность толщины игровой карты на диске шириной в милю и высотой 300 ярдов.

Очевидно, что проверка такой точности поверхности — нетривиальная задача. Обычные штангенциркули, измерительный прибор машинистов, имеют максимальную точность всего около 10 микрометров (*мкм*), или около 20 длин волн зеленого света. Даже если бы были возможны достаточно точные штангенциркули, возникла бы дополнительная проблема, связанная с повторным размещением их на искривленной поверхности. Разброс измерений значительно превысил бы внутреннюю точность измерительного инструмента.

Очевидно, что необходимо какое-то устройство или технология, способная обнаруживать микродеформации на поверхности. Свет сам по себе является наиболее подходящим инструментом. Менее очевиден точный способ использования света для выявления этих дефектов, не требуя таких же строгих измерений, как измерение профиля поверхности путем физического контакта.

Например, нетрудно придумать совершенно бесполезные способы измерения поверхностей. Можно поместить точечный источник света (скажем, точечное отверстие) сбоку от зеркала (см. рис. 1-1) и отразить его в точку на экране. Перемещая маску над объектом, мы могли видеть, как пятно было вынуждено смещаться. В принципе, этот метод будет содержать всю информацию об ошибках, но это не самый простой способ. Пятно нечеткое, систему сложно настроить и сфокусировать, а измерения сложно свести, поскольку они проводятся далеко от оптической оси. Положение пятна определяется общей кривизной поверхностей и движениями маски, а не интересными отклонениями от кривизны. Способ проведения точного и просто интерпретируемого теста исключает трудности первого порядка, такие как врожденная кривизна поверхности. Лучше всего это делать вдоль оптической оси либо вблизи фокуса, либо в центре кривизны линзы или зеркала.

Точные испытания возможны, если используются сильные стороны геометрии испытаний. Бесполезный тест на рис. 1-1 становится очень точным каустическим тестом, когда пятно изображения перемещается вблизи центра кривизны и

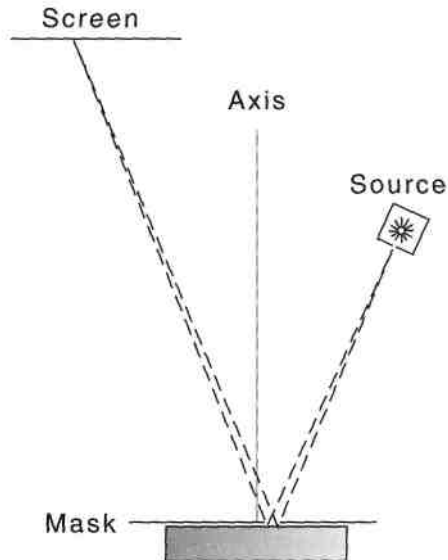


Рис. 1-1. Плохо продуманная система тестирования. Выравнивание, фокусировка и данные, сокращение будут а кошмар, хотя тест содержит всю информацию, необходимую для определения формы поверхности зеркала.

Датчик оснащен ножевой кромкой или проволокой.

1.2.1 Источники ошибок

Точность формы поверхности зависит от жесткости материала и определения того, что означает точность поверхности. Например, калибры и пластины с плоской поверхностью большинства машинистов, абсолютные стандарты, по которым они проверяют свои измерительные инструменты, представляют собой прямоугольные куски стали. Сталь — довольно негибкий материал, и машинисты считают, что сталь способна сохранять форму. Эти блоки более чем достаточно точны для той точности, которая требуется при обработке, при условии, что температура в помещении не слишком сильно меняется. Однако для оптического использования масштаб точности намного меньше.

Микроскопически стальной блок при нагревании расширяется. Его линейные размеры зависят от температуры окружающей среды. Обычно это изменение не влияет на оптические характеристики — в конце концов, сфера остаётся сферой, даже если у неё немного другой радиус. Но при изменении температуры части металла изменяются быстрее, и внутренние напряжения нарастают. Поверхность слегка коробится, поскольку температура изделия неравномерно следует за быстро меняющейся температурой наружного воздуха.

Точно так же стекло деформируется при нагревании. Хотя оно разбухает меньше, чем металл, теплопроводность стекла ниже, и у него возникают проблемы с отводом тепла. Зеркала обычно покрыты с одной стороны металлом, что усложняет способ излучения энергии. Температура стекла является сложной функцией теплового излучения, конвективного воздушного охлаждения и проводимости через относительно небольшое количество точек, в которых поддерживается оптический диск.

Стекло не только меняет форму при нагревании, оно деформируется под давлением. Полезный способ рассмотреть стеклянные диски в масштабе длин волн — представить их как листы резины. Если нажать на верхнюю часть, поверхность опустится. Если неправильно подпереть нижнюю часть, то весь диск просядет, а верхняя поверхность деформируется. Тонкие детали труднее удерживать плоскими, чем толстые, а большие — труднее, чем маленькие. Ячейки, в которых удерживается оптика, не должны ее пережимать или деформировать.

Ни один процесс не является таким стрессовым для оптики, как изготовление. Простое измельчение даже имеет несколько подводных камней. Скажем, зеркальный диск имеет небольшую цилиндрическую кривизну на задней стороне — он качается на подложке, а не сидит ровно. Под давлением шлифования он деформируется от своего «хребта» и испытывает астигматическую кривизну при снятии давления.

Однако этап изготовления, на котором возникает большинство ошибок, — это полировка. Это происходит на полировальной смоле, материале, который никто до конца не понимает. Некоторые опытные оптики знают пределы и общее поведение высоты звука, но даже после многих лет опыта они часто удивляются его нестабильности.

Смола — это высоковязкая жидкость, наносимая тонким слоем (от 3 до 6 мм) на диск, используемый в качестве инструмента. Эта притирочная поверхность (или «притир») обычно заштрихована канавками, которые позволяют жидкости растекаться и легче прилегать к полированной поверхности. Смола будет вести себя более или менее как твердое тело на высоких скоростях и как жидкость на низких. Например, если ударить по нему молотком, он разобьется. Однако положите кусочек чистой смолы на край чаши, и в конце концов вы обнаружите, что она опустилась на дно.

Во время полировки порошкообразные абразивные зерна погружаются в поверхность смолы, где они удерживаются в виде микроскопических скребков. Некоторые полировочные средства более эффективны, чем другие, и вызывают выделение большего количества тепла на коленях. Спротивление деформации пека сильно зависит от температуры. Его характеристики на внешней части диска будут заметно отличаться от характеристик внутренней части, поскольку влажный пек на периферии подвергается воздействию воздуха и охлаждается быстрее за счет испарения. Если полировку растянуть слишком долго, инструмент для пека высыхает, перегревается и теряет форму. Плохие привычки полировки приведут к чрезмерному износу края оптического диска, что при чувствительных тестах придаст ему изношенный вид. Если не менять ход при использовании станка, в оптике могут образоваться неглубокие круглые каналы. В случае светосильной асферической оптики необходимо применить больше полировки.

в центре диска. Очевидно, что существует множество возможностей для ошибок найти путь к оптической поверхности.

1.2.2 Меры оптического качества

Одним из способов измерения оптического качества является измерение ошибки размаха волнового фронта. Волновой фронт — это линия, проведенная вдоль гребня или впадины волны. В областях, удаленных от фокуса, волновой фронт перпендикулярен направлению движения волны. Если использовать удобный пример, волновой фронт — это гребень волны серфера, параллельный пляжу. Волна движется к пляжу под прямым углом к гребню.

Идеальный сходящийся волновой фронт — это часть сферы с центром в фокусе. Свет от точечного источника сходится к пятну минимального размера, называемому «дифракционным диском». После прохождения оптической системы с ошибками волновой фронт отходит от сферической формы, пятно изображения становится больше и менее интенсивным.

Представьте себе две сферы с общим центром в фокусе, напоминающие слою лукавицы. Внешний слой касается точки, которая больше всего отстает от реального волнового фронта, а внутренний — точки, ближайшей к центру сферы. Различные радиусы этих сфер определяют общую ошибку волнового фронта. (См. рис. 1-2.)

Дж. У. Стрэтт (лорд Рэлей) сформулировал часто цитируемое правило: если общий волновой фронт ошибка – пик-впадина – превышает $1/4$ длины волны желто-зеленого света (550 нм), то оптика начинает заметно деградировать. Причина того, что изображение начинает разваливаться, проста — значительная часть сходящегося волнового фронта теперь имеет фазу, слегка «несогласную» с большинством. Правило Рэля не является жестким ограничением. Некоторые люди с трудом воспринимают снижение качества до тех пор, пока общая ошибка волнового фронта не превысит $1/3$ длины волны. Другие более разборчивы, обнаруживая деградацию уже на этапе $1/8$ длины волны и ниже. Большая часть чувствительности к оптическим дефектам зависит от типа наблюдения, типа ошибки и опыта наблюдателя (Чераволо). *и другие*. 1992 год; Тексеро, 1984).

Ниже приведены некоторые варианты того, как разные магазины оптики заявляют одно и то же. $1/4$ -качество длины волны:

- " $1/8$ -волновая поверхность". Скажем, главное зеркало имеет $1/8$ -удар по длине волны на нем. Падающий волновой фронт отражается от пика выступа, в то время как прилегающая часть волнового фронта вынуждена перемещаться к основанию ошибки. Этот участок волнового фронта движется $1/8$ длины волны входит и $1/8$ длина волны выходит, оставляя его $1/4$ длины волны за передним фронтом волны.
- " $\pm 1/16$ -волновая поверхность". Если то же самое $1/8$ -холм с длиной волны не измеряется от основания до гребня, а измеряется от его среднего положения, ошибка

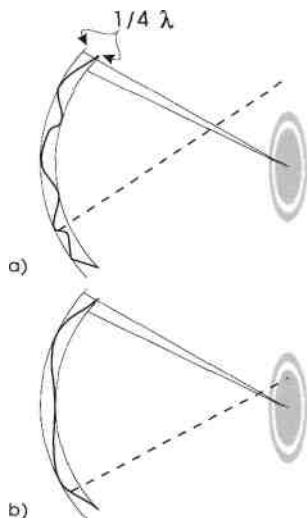


Рис. 1-2. Разница между адекватной и очень хорошей оптикой. Оба этих волновых фронта содержатся в двух оболочках: $1/4$ длины волны, но более грубый из а) рассеивает часть света за пределами радиуса дифракционного пятна минимального размера. (Не в масштабе.)

Снова ложно делится на два.

- " $1/27$ -волновое среднеквадратичное значение на поверхности». Эта широко используемая мера в оптической промышленности известна как *Критерий Марешаля* (Рожденный и Вольф 1980, с. 469). А $1/4$ длина волны сферической аберрации (крупномасштабное отклонение от сферы) примерно соответствует $1/14$ среднеквадратичный критерий Марешаля (Maréchal, 1947). Измерение его на поверхности снова разрезает его пополам.
- $1/31$ -волновая среднеквадратичная точность поверхности гелий-неонового лазера». Красный свет гелий-неонового лазера имеет большую длину волны, и та же ошибка кажется меньшей. Легко рассчитываемый переход к визуальной длине волны не был осуществлен.

Почти у каждого пользователя телескопа есть смутные воспоминания о чтении о $1/4$ -Допуск Рэля на длину волны. Вышеуказанные точности, по-видимому, превышают $1/4$ -ограничение длины волны с запасом места, но это разные описания одного и того же $1/4$ -допуск по длине волны.

Эти различные заявления о точности поверхности по своей сути не являются нечестными, если они даны достаточно подробно, чтобы можно было различить их.

значения. Фактически, $1/14$ Среднеквадратичное отклонение Марешаля для длины волны превосходит предел Рэлея, поскольку оно количественно определяет долю волнового фронта, отклоняющуюся от идеальной сферы. Но эти точные данные редко сопровождаются инструкциями по расшифровке, и потребителям приходится задаваться вопросом, что означают эти утверждения, даже если они знают различия.

Таким образом, рекламные претензии коммерческих фирм в течение некоторого времени находились в запутанном состоянии. В последние годы определенная часть производителей потребительских телескопов разумно избегала вопроса о присвоении номеров своей оптике. Они просто заявляют, что их оптика ограничена дифракцией, и на этом не останавливаются. Такое обозначение лучше, чем искусственно завышенные утверждения, приведенные выше. «Дифракционно-ограниченный» условно означает, что $1/14$ Среднеквадратичный предел Марешаля для длины волны был достигнут (Шредер, 1987).

Еще одним фактором, которым часто пренебрегают при оценке оптического качества, является наклон погрешности. Если на оптике появляются острые каналы, загнутые края или шероховатости, общая ошибка волнового фронта часто может находиться в пределах расширенного допуска Рэлея. Аномальный наклон не сохраняется по всей апертуре. Резко наклоненный разлом по-прежнему отклоняет свет от центрального пятна, загрязняя остальную часть изображения, но оптика по-прежнему «официально» идеальна.

А. Данжон и А. Кудер обратились к этой теме в своей книге *Люнеты и др. Телескопы* (Данжон и Кудер, 1935, стр. 518–522). Они заметили, что некоторые инструменты могут выйти за пределы Рэлея, но при этом обладают достаточной шероховатостью поверхности, чтобы рассеивать туманное свечение на изображениях Луны и планет. Они заявили, что оптика не может быть оценена как «хорошая», пока не будут одновременно выполнены два условия:

1. На большей части апертуры волновой фронт имеет пологий наклон и не отклоняет световые лучи за пределы дифракционного диска.
2. Рэлей $1/4$ -допуск на длину волны везде соблюдается, и на большей части апертуры отклонения должны быть заметно меньшими.

Условие №2 — это всего лишь предел Рэлея, с устным предупреждением, преследующим ту же цель, что и ограничение среднеквадратического отклонения. После формулировки этих двух условий Данжон и Кудер отмечают, что условие № 1 на наклоне зеркала обычно труднее выполнить, чем условие № 1 на наклоне зеркала. $1/4$ состояние длины волны. Несмотря на то, что оба волновых фронта на рис. 1-2 находятся в пределах допуска Рэлея, волновой фронт на рис. 1-2b лучше всего подходит для визуализации, поскольку он имеет более пологий наклон.

Кстати, для аберраций, которые плавно изменяются по всей апертуре (таких как ошибка, изображенная на рис. 1-2б), максимальное отклонение волнового фронта, приводящее к условию №1, ближе к $1/7$ длина волны. Таким образом, оптика, действительно удовлетворяющая обоим условиям, не просто хороша, а превосходна.

Другое число, обычно используемое в качестве критерия оптического качества, — это *Коэффициент Штреля* отверстия (Борн и Вольф 1980, стр. 462; Махаджан 1982). Коэффициент Штреля определяется как интенсивность пятна изображения в его центральной самой яркой точке, деленная на ту же интенсивность изображения без аберрации. $1/4$ - допуск Рэля на длину волны по сферической аберрации приводит к падению коэффициента Штреля до значения 0,8. Коэффициент Штреля равен 1,00 при идеальной оптике. Критерий Марешаля относительно среднеквадратической аберрации был основан на том, что он приводит к такому же уменьшению коэффициента Штреля.

Самый полный, хотя и обширный, способ определения оптического качества – это представление подробной информации. *передаточная функция модуляции* (или МТФ), то есть способность оптической системы сохранять контрастность полосок с различным расстоянием между ними. Именно этот метод будет использован в этой книге. Никакая оптическая проблема не сможет избежать МОГ. Запыленная оптика, ямки на оптической поверхности, спайдерная дифракция, вибрация телескопа, микрорывь, аберрации и любые препятствия проявляются в снижении передаточной функции. Преимущество диаграмм МТФ заключается в том, что они определяют расстояние между деталями, на которые воздействуют оптические проблемы.

Можно легко определить другие столь же действенные меры оптического качества. Более подробно они будут обсуждаться в главе 10.

1.3 Звездный тест — краткий обзор

Наблюдатели справедливо считают расфокусированный инструмент не чем иным, как проблемой, которую необходимо устранить. Телескоп либо сфокусирован, либо практически бесполезен — по крайней мере, для той работы, для которой он предназначен. При правильном использовании телескоп должен быть сфокусирован как можно точнее.

При обычном использовании телескопа неявно подразумевается *фиксированная цель* предположение, согласно которому изображение, создаваемое объективом, является всей целью телескопа. Окуляр отводится на второстепенный статус простого аксессуара, лупы. Он скользит вдоль оптической оси и имеет только одну правильную настройку.

Звездный тест использует телескоп по-новому. Надо предположить, что окуляр имеет фиксированное положение. С этой точки зрения плоскость поля зрения окуляра рассматривается как вся цель упражнения. Окуляр считается *всегда* находится в правильном фокусе и исследует все, что занимает плоскость его поля. Плоскость поля обычно ограничена маской с острыми краями, называемой *полевая остановка*. Если перевернуть окуляр и посмотреть вниз, этот упор обычно виден в виде кольца внутри основания. Полевая диафрагма — это четкий край, который вы видите в окуляре. Эта грань не имеет ничего общего, как кажется на первый взгляд, с границей цели.

На рис. 1-3 показан идеализированный окуляр. Мы считаем окуляр неподвижным, а объектив подвижным.

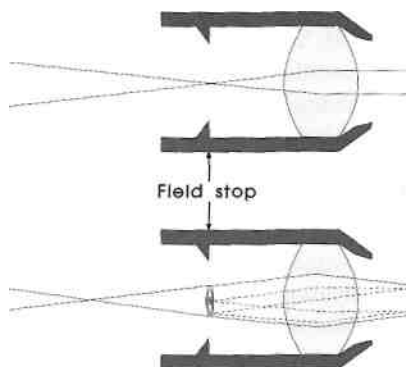


Рис. 1-3. Использование окуляра для звездный тест. Верхнее расположение показывает обычную правильную настройку окуляра. Окуляр внизу показывает проверку расфокусированного диска в ходе звездного теста как столь же действительную настройку.

Если, как показано на рис. 1-3 сверху, объектив расположен точно на том расстоянии, которое позволяет поместить изображение звезды в плоскость поля окуляра, то инструмент называется *в фокусе*. Свет, исходящий от точечного источника, выходит из задней части окуляра параллельным пучком. На рис. 1-3 внизу показан *вне фокуса* инструмент. Здесь путь лучей, изображенный сплошными линиями, выходит из трубки сходящимся пучком, который не фокусируется должным образом на сетчатке, если аккомодационная способность глаза не очень велика.

«Путь обзора» двух точек на расфокусированном диске обозначен пунктирными линиями. Можно представить, что пучок света аккуратно разрезается в фокальной плоскости окуляра и что окуляр идеально отображает этот срез. Если окуляр перемещать взад и вперед по положению фокуса, каждый срез можно рассматривать по очереди, и память всех таких срезов формирует коллективную запись поведения света вблизи фокуса. Нам разрешено использовать эту точку зрения, поскольку положение окуляра в фокусе не более особенное, чем положение вне фокуса.

1.3.1 Дифракционные кольца

Почти везде сложную ситуацию сходящегося волнового фронта можно аппроксимировать, заменив волновой фронт маленькими «стрелками», движущимися перпендикулярно ему. Эти стрелки называются *лучи света* а интенсивность такого луча можно рассчитать как площадь поперечного сечения пучка лучей. Однако элементарная геометрия, используемая для сходящегося светового конуса, приводит к серьезному нарушению лучевого приближения. Если определенное количество энергии падает на область апертуры, интенсивность можно рассчитать как

эта мощность делится по площади.² На полпути к фокусировке площадь конуса уменьшилась до $1/4$ его значения прямо напротив апертуры, но он по-прежнему содержит ту же мощность, поэтому интенсивность увеличилась в 4 раза. Снова пройдите половину пути, и интенсивность еще больше увеличится в 4 раза, в 16 раз больше, чем была при открытии. Вы можете удваивать его снова и снова, пока не сможете сосредоточиться. Что там происходит?

В описании луча площадь конуса стремится к нулю по мере приближения света к фокусу. Эту площадь необходимо умножить на интенсивность, чтобы мощность стала такой же, как была на всем протяжении пути. Поскольку скорость света в воздухе одинакова, энергетическое содержание луча не увеличивается и не уменьшается. Лучевое приближение утверждает, что если оптика идеальна, интенсивность точки изображения бесконечна. Излишне говорить, что бесконечная интенсивность невозможна.

В течение двухсот лет между изобретением телескопа и окончательным принятием волновой теории света люди действительно верили, что оптическое качество не имеет ограничений. Если бы оптика была изготовлена превосходного качества, центральное пятно уменьшилось бы в размерах — по крайней мере, так думали оптики. Должно быть, они были в агонии, когда их оптические шедевры, над которыми они так усердно работали, все еще показывали этот диск, окруженный системой колец.

Теперь мы знаем, что существует фундаментальный предел визуализации. Дифракция смягчает изображение в области фокуса. Для данного фокусного расстояния телескопа центральное пятно (называемое *Эйри диск*) линейно уменьшается в диаметре для больших апертур. Формула радиуса диска Эйри с диаметром отверстия D и фокусное расстояние f является

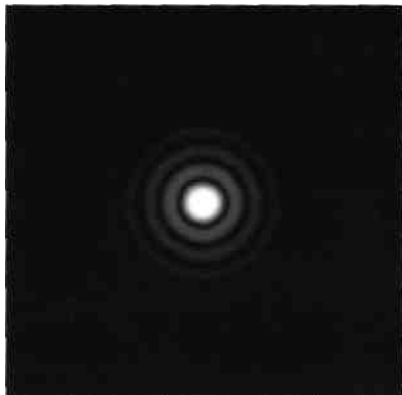
$$r_{\text{Эйри}} = \frac{1.22\lambda f}{D} \quad (\lambda \text{ — длина волны}). \quad (1.1)$$

Таким образом, диаметр дифракционного диска составляет $11/\text{м}$ ($0,0004$ дюйма) для диафрагмы 150 мм (6 дюймов) $f/8$ и $5,5 \text{ мкм}$ для диафрагмы 300 мм (12 дюймов) $f/4$. Поскольку 4 раза свет был перехвачен большим телескопом и зажат внутри $1/4$ площади, больший телескоп имеет интенсивность центрального изображения в 16 раз ярче. Сфокусированное дифракционное изображение появляется в левой части рис. 1-4 — весь квадрат $(20\lambda)/D$ через.

Тем, кто привык к чисто символическим уравнениям, коэффициент 1,22 в выражении для диска Эйри кажется запутанным и неточным, но он неизбежен. Его источником является округлость апертуры. Если бы мы сделали квадратную цель расстояния I к стороне самая яркая часть дифракционного пятна будет представлять собой небольшой квадрат с размером стороны $(2\lambda e)/x$. Аналогично, апертуры

²Радиометрически эта величина вовсе не является «интенсивностью», а должна называться «плотностью потока излучения». Однако этот термин общепринят среди физиков.

сосредоточенный



Вне фокуса

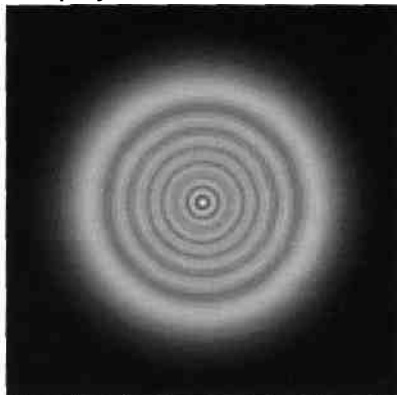


Рис. 1-4. Теоретическое дифракционное изображение идеального телескопа, как для в фокусе и один расфокусированный случай. Направление движения окуляра не имеет значения; рисунок расфокусировки выглядит одинаково с обеих сторон. Кадр слева увеличен в 4 раза по сравнению с правым.

с абберациями и препятствиями имеют свои уникальные размеры дифракционного пятна. В диске Эйри нет ничего особенного, за исключением того, что это идеальный дифракционный диск с круглым окном, на который похожи многие настоящие оптические устройства.

Дифракция – это угловой эффект. Угловое размытие изображения не уменьшается за счет увеличения фокусного расстояния телескопа или, что то же самое, увеличения. Если увеличить фокусное расстояние вдвое, размер диска Эйри также увеличится вдвое. До тех пор, пока не была оценена независимость фундаментального размытия изображения от фокусного расстояния, телескопы обычно определялись фокусным расстоянием, а не апертурой. В настоящее время такая терминология выглядит причудливой.

Центральное место – это еще не вся история. Тонкие прозрачные кольца окружают яркое пятно. В идеальных условиях большими инструментами можно наблюдать до 3–4 колец, но звезды в маленькие телескопы легко показывают только одно кольцо.

Рисунок расфокусировки на рис. 1-4 имеет несколько круглых борозд. Это тоже дифракционные кольца, хотя их расположение и величину вычислить непросто. Первая гипотеза заключалась в том, что темные линии были ранее скрытой структурой дифракционного изображения, которая теперь обнажена, потому что расширяющийся диск наполнил ее светом. Однако это разумное предположение неверно. Изображения ведут себя совсем не так.

По мере того, как фокусер вдвигается или выдвигается, бороздки продолжают появляться в центре и двигаться наружу, как рябь, распространяющаяся от камешка, упавшего в лужу. Эта центральная точка последовательно затемняется, а затем светлеет, становясь самой яркой частью диска. Он делает это каждый раз, когда создает

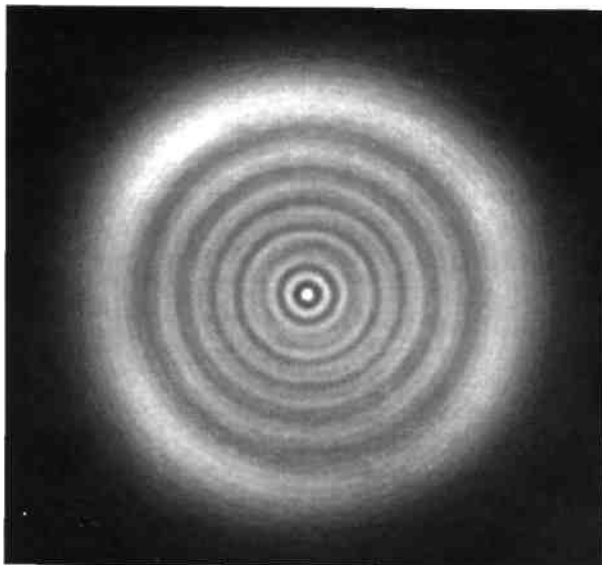


Рис. 1-5. Фотография реальной ситуации расфокусировки, рассчитанная на рис. 1-4. Изображение было взято с сильно заглушенный рефрактор.

новое кольцо. Единственная, казалось бы, неизменная особенность расширяющегося пятна — широкое внешнее кольцо. При повороте фокусера оно кажется уже, но никогда не исчезает.

Обратите внимание на еще одну особенность. Расширенный диск канализирован, но его средняя яркость более или менее постоянна. Внешнее кольцо несколько ярче, чтобы усреднить темное кольцо внутри него. Тем не менее, за исключением немного более яркого внешнего кольца, диск удивительно плоский. Этот принцип еще более верен для изображений дифракции белого света. Каждый участвующий цвет имеет разное количество колец на расширенном диске. Минимумы одного цвета располагаются поверх максимумов другого цвета, и конечный эффект в значительной степени сводится к размытию любых изменений внутренней части диска. Далеко не в фокусе, в беспрепятственные телескопы виден плоский диск с четко выраженным внешним кольцом, отделенным от внутреннего темным кольцом. Внутри существует лишь намек на рифленую структуру.

Наконец, еще одна характеристика имеет основополагающее значение для звездного теста. Диск внутреннего фокуса примерно идентичен диску внешнего фокуса. Никакая круговая симметричная аберрация не может выглядеть одинаково по обе стороны от фокуса. Если узоры одинаковы и имеют круглую форму, оптика почти идеальна.

На рис. 1-5 показана реальная фотография дефокусированной ситуации, рассчитанная на рис. 1-4. Контраст рисунка был увеличен за счет использования

один очень чистый красный свет гелий-неонового лазера, отраженный в небольшой отражающей сфере. Отверстие, пробитое в металле и помещенное над небольшим рефрактором, создавало апертуру. Теоретическая картина воспроизводит реальное поведение, даже показывая террасирование внешних частей диска.

1.4 Причина звездного тестирования

Появление расфокусированного изображения, показанного на рис. 1-5, встречается редко. Аберрации и другие оптические трудности разрушают это совершенство. Перемещая окуляр внутрь и за пределы фокуса, вы можете обнаружить и, возможно, идентифицировать проблемы, мешающие вашему телескопу. Сравнение изображений, видимых на одинаковых расстояниях внутри и снаружи фокуса, особенно эффективно. Различия между этими рисунками выявят одну из наиболее распространенных оптических ошибок — сферическую аберрацию.

Редко можно увидеть какую-либо аберрацию, не украшенную смесью других оптических эффектов. Дифракционную картину трудно диагностировать с помощью звездного теста без внешней информации. Однако вопрос не в диагнозе. После проверки вы можете решить, что одна из описанных здесь проблем связана с доминированием в вашей системе. Вы должны рассматривать выявление проблемы только как интересный факт, если ошибка втерта в стекло, или использовать его как руководство для модификации телескопа или места, если ошибки исправимы.

Прочитав эту книгу, вы научитесь создавать наилучшее изображение как в фокусе, так и вне фокуса. Этот внешний вид не меняется. Оно может быть изменено препятствиями, но последствия вторичного воздействия предсказуемы.

Хорошее звездное изображение имеет краткий список отличительных характеристик:

1. Сфокусированное изображение звезды имеет круговую симметрию; у него есть тусклое кольцо, охватывающее внешний периметр дифракционного диска, а кольца за ним исчезающе темные. (У плохой оптики тоже есть кольца, но они яркие, и их можно пересчитать. Зачастую они асимметричны.)
2. Изображение вне фокуса имеет круговую симметрию; он одинаков для всех равных расстояний по обе стороны от фокуса. (Изображения аберрированных отверстий могут быть теми или иными, но они не являются одновременно одинаковыми и круглыми.)
3. Расфокусированное изображение имеет довольно ровное распределение интенсивности в радиальном направлении, за исключением немного более яркого внешнего кольца. Он разделен дифракционными бороздками, но они очень мало контрастны. В основном они размыты в белом свете (за исключением внутренней части внешнего кольца и внешней части вторичной тени, если таковая имеется).
4. Если используется центральное препятствие, его тень снова появляется во время расфокусировки на равных расстояниях по обе стороны от фокуса.

Вы также научитесь систематическому выявлению оптических ошибок и увидите закономерности интенсивности изображения, рассчитанные для известных величин aberrаций. Используя эту информацию, вы сможете оценить размер aberrаций вашего телескопа и принять меры, если они серьезные.

Также полезно менять точки зрения. Многие полезные концепции и процедуры современной физической оптики могут быть использованы наблюдателями для более полного понимания своих инструментов. Первая и самая важная из этих концепций — рассматривать телескоп как обобщенный фильтр. Затем мы можем использовать идеи, разработанные для электронной промышленности, с некоторыми модификациями, меняющими терминологию на оптику. Вторая концепция — это идея о том, что свет — это волна. Дифракция приводит к фундаментальным ограничениям качества изображения. Используя точки зрения волновой оптики и теории фильтрации, мы вынуждены меньше полагаться на сомнительный запас народной мудрости, мифологии и верований, накопившийся вокруг использования телескопов.

зТакой способ рассмотрения процесса визуализации называется оптикой Фурье.

Глава 2

Сокращенное руководство по Star-Test

2.1 Некоторые необходимые предварительные сведения

Для успешного проведения звездного теста вам понадобится окуляр с большим увеличением. Точная мощность варьируется от телескопа к телескопу и зависит от того, что вы пытаетесь увидеть, но она составляет около 10 на сантиметр апертуры. Для обычного 20-см телескопа Шмидта-Кассегрена увеличение должно равняться $20 \times 10 = 200$. Поскольку фокусное расстояние такого инструмента составляет 2 метра, фокусное расстояние окуляра должно быть около 10 мм. Инструменты с низким фокусным расстоянием не оцениваются с такой же степенью точности, как планетарные телескопы, поэтому вы можете использовать меньшую мощность. На самом деле, вам, возможно, придется пойти на компромисс, поскольку окуляры высокой мощности для таких телескопов обычно не доступны. Рефракторы требуют большего увеличения.

Вам следует настроить свой телескоп так, чтобы он не пропускал близлежащие дороги или крыши домов, поскольку эти конструкции удерживают дневное тепло и медленно отдают его ночью. Части звездного теста можно выполнить, глядя в небольшую турбулентность, но лучше по возможности избегать дополнительных источников aberrаций. Вам также следует дать вашему телескопу достаточно времени между настройкой и звездным испытанием, чтобы он приблизился к температуре окружающей среды. Прибор не нужно транспортировать в место темного неба, поскольку испытательной целью является довольно яркая звезда.

Испытанию неизмеримо помогает хорошо настроенный инструмент. Если возможно, коллимируйте телескоп перед его тестированием. В одном из разделов ниже вы узнаете, как распознать серьезное смещение, но дальнейшее тестирование будет временно остановлено, если телескоп не будет хотя бы грубо выровнен (см. главу 6).

Необязательно ждать полной темноты, но надо уметь найти звезду. Лучшая звезда для 4-6-дюймовых телескопов имеет вторую звездную величину, но

более крупные инструменты требуют соответственно более тусклых звезд. Крошечные рефракторы могут потребовать звезду первой величины. Дневные испытания можно провести и с использованием блеска Солнца, отраженного в гладком сферическом елочном орнаменте. Разместите его на расстоянии 60-300 метров. с промежуточной дорожкой по траве. Постарайтесь повесить лампочку так, чтобы ее было видно на ровном фоне.

Если вы носите очки, оставьте их. Это предупреждение должно относиться только к тем, кто страдает астигматизмом, но перефокусировка сильной коррекции, обычно выполняемой очками, может привести к увеличению аномальной аберрации окуляра. Предотвратить этот дополнительный источник ошибок достаточно легко. Кроме того, вам нужно осмотреть только центр поля зрения.

Самая эффективная форма звездного теста требует, чтобы вы знали, насколько сильно вы расфокусировали изображение. Эти детали будут объяснены в главе 5, но оставшаяся часть главы познакомит вас с большинством форм оптических проблем.

Наконец, прежде чем приступить к оценке своего инструмента, решите, чего вы реально ожидаете от него. Имеет ли он низкое фокусное расстояние для такого типа инструмента? Ньютоновский телескоп с диафрагмой $f/5$ или ниже идет на компромисс между оптическим качеством и физическим размером. Его не следует оценивать по тем же стандартам, что и зеркало Ньютона с фокусным соотношением $f/8$. Точно так же ахроматический рефрактор с самым богатым полем зрения и фокусным отношением $f/5$ не должен иметь таких же жестких допусков, как обычный лунно-планетарный рефрактор.

2.2 Оптические проблемы в свою очередь

Звездный тест можно использовать с любым телескопом, если вы помните только один из принципов, обсуждавшихся в последней главе: *Если оптика идеальна, расфокусированные изображения представляют собой достаточно равномерно освещенные диски. Они кажутся одинаковыми на одинаковых расстояниях внутри и вне фокуса.*

Первая процедура, которую следует попробовать, называется «мгновенным» тестом. Часто этой грубой оценки бывает достаточно, чтобы признать телескоп плохим. Используя большое увеличение, покачивайте фокусирующий вращатель вперед и назад для достижения наилучшего фокуса. Хорошие телескопы быстро дадут четкую фокусировку. Плохие телескопы предлагают ряд одинаково приемлемых положений фокусировки, но ни одно из них не является очень хорошим. Вы не будете знать, где именно остановить руку (Suiter 1990).

Однако не стоит слишком быстро осуждать прибор из-за плохих результатов в моментальном тесте. Этот быстрый метод имеет несколько практических трудностей. Часто инструмент не закреплен жестко, и трудно определить состояние изображения, пока трясете телескоп рукой.

¹См. главу 5 для получения точных ограничений по размеру и расположению лампы. Большее расстояние предназначено для больших и быстрых инструментов.

Кроме того, у некоторых наблюдателей есть глаза, способные аккомодировать большой фокус. Фокусировка глаз не всегда находится под сознательным контролем. По мере приближения к фокусу глаз фиксируется, и внутренний механизм фокусировки нарушает тест.

Идеальная круглая апертура имеет только один вид дифракционного диска при каждом значении расфокусировки. Все модификации этого шаблона представляют собой различные уровни оптических проблем. Такие трудности существуют в трех основных категориях:

1. Базовые характеристики оптической системы, такие как

- (а) вторичное зеркало или диагональное препятствие оптического пути,
- (б) крестовины перед зеркалом или засоры в зажиме зеркала,
- (в) изменения пропускания (виньетирование и несовершенства покрытий),
- (г) изменение цвета в преломлении линз.

2. Временные или исправимые проблемы, такие как

- (а) несоосность или ненормальный наклон оптических элементов,
- (б) эффекты атмосферной турбулентности,
- (с) артефакты, вызванные разницей температур вблизи или внутри телескопа,
- (г) необычные деформации оптических элементов (например, защемление или провисание тонких зеркал),
- (д) пыль или грязь на зеркале или линзах.

3. Ошибки на стекле, такие как

- (а) сферическая аберрация (неспособность волнового фронта соответствовать сфере),
- (б) шероховатые оптические поверхности (вызывающие рассеяние света от центрального пятна),
- (в) зоны (светлые круглые холмы или впадины в зеркале, включая загнутые края стеклянных дисков),
- (г) хроматическая аберрация (неисправленные цветовые ошибки),
- (д) астигматизм (неравномерное растяжение изображения вдоль оси).

Некоторые из этих ошибок кратко обсуждаются ниже, а некоторые сохранены для основной части книги. Вы должны иметь в виду, что существует правильный порядок рассмотрения оптических ошибок. Вы должны научиться распознавать характерные расфокусированные звездные узоры, которые являются

следствие выбора вами оптической системы (категория «1» выше). Например, в простых рефлекторах ничто не избавит от препятствия, поэтому следует ожидать его тени на расфокусированном изображении звезды.

Далее вы должны изучить стратегии, которые приводят к минимальному вмешательству временных или излечимых трудностей категории «2». Вы не сможете провести надежную проверку на небольшой астигматизм, если ваш инструмент безнадежно смещен. Если вы вынесете теплый телескоп из дома на холодную улицу, изображения будут танцевать и кружиться. Ваша трубка часто отводит тепло от зеркала, вызывая характерное растяжение токов трубки. Часто ваша оптика жестко привязана к своим ячейкам, и деформация, вызванная такими нагрузками, маскирует истинные оптические ошибки, ввевшиеся в стекло. Наконец, вы должны определить, достаточно ли хороши атмосферные изображения для проведения достоверного теста. Хотя звездный тест менее чувствителен к турбулентности, чем оценка разрешения двойной звезды, его лучше всего проводить в спокойном небе.

После того как вы определили, что ошибки категории «2» достаточно малы, можно переходить к поиску ошибок в форме стакана. Эти ошибки самые изнурительные, потому что с ними ничего нельзя сделать, кроме как перенастроить оптику. Даже здесь порядок важен. Сначала вам следует поискать сферическую аберрацию, поскольку это наиболее распространенная ошибка.

Наконец, не следует слишком сильно расфокусировать изображение. Если вы это сделаете, вы не найдете ошибок. Если вы тестируете светосильный ньютоновский объектив с диафрагмой $f/4$, вы, вероятно, лучше всего заметите большинство этих ошибок при движении окуляра менее $1/30$ дюйма (0,85 мм). Если вы тестируете медленный объектив Шмидта-Кассегрена с диафрагмой $f/10$, то же последовательность изображений будет видна при движении окуляра на $1/5$ дюйма (около 5 мм). Эти значения взяты из Таблицы 5-1.

2.2.1 Вторичное зеркальное препятствие

Схема внутреннего фокуса такая же, как и схема внешнего фокуса, даже для инструментов с препятствиями. Хотя наличие диагонального или вторичного зеркала несколько ухудшает оптическое качество, вид безаберрационного изображения по обе стороны от фокуса одинаков для хорошей оптики. В качестве примера на рис. 2-1 показана идеальная в остальном апертура, когда преграда увеличена до 20% и 33%.

Самым замечательным отличием от беспрепятственного поведения является грубость рисунка. Мы променяли тонкий узор беспрепятственного узора на неуловимые вариации, вызванные второстепенным. В освещенной области за пределами тени вторичного компонента на схеме 33% показаны только два широких ярких кольца. По диску наблюдается меньше провалов интенсивности.

Единственное различие между этими тремя строками — размер вторичного. Почему крошечное препятствие — всего лишь $1/9$ площади поверхности — имеют такой глубокий эффект?

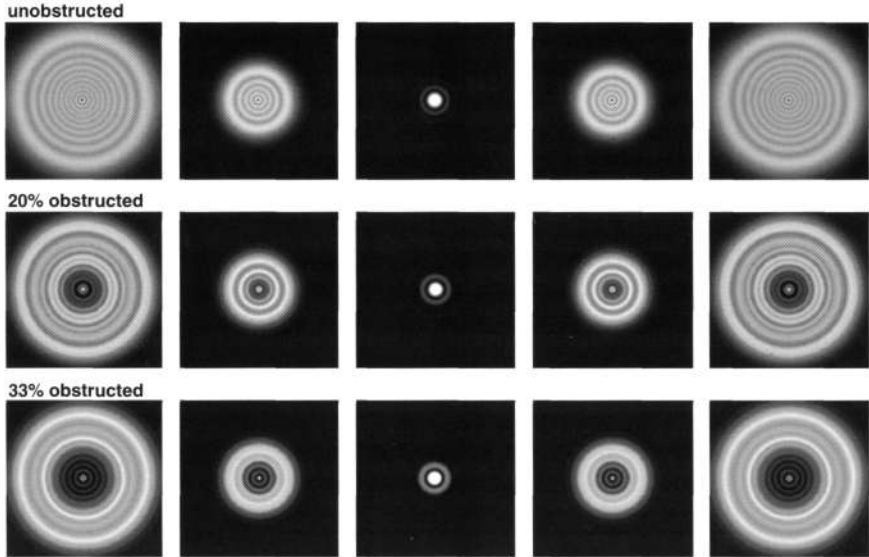


Рис. 2-1. Центральное препятствие. Изображения трех идеальных телескопов показаны от внутреннего фокуса (слева) до внешнего фокуса (справа). Типичное поведение (вверху) рефракторов, (в центре) длиннофокусных ньютоновцев, (внизу) коммерческих ньютоновцев Шмидта-Кассегрена.

Во-первых, на самом деле это не имеет такой уж большой разницы. Эти провалы чрезвычайно деликатны и разрушаются практически всем (например, при смешивании цветов в белом свете). За исключением незначительного просветления и тени в центре, диск по-прежнему довольно однороден и одинаков по разные стороны от фокуса.

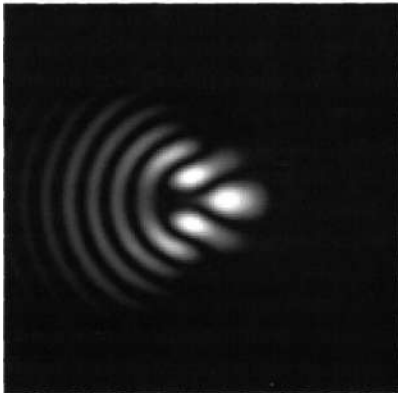
Для целей дифракционных расчетов нам разрешено притворяться, что тень представляет собой миниатюрное отверстие, только в противофазе с большим отверстием (так называемый принцип Бабины - Necht 1987, стр. 458). Это крошечное препятствие имеет гораздо большую дифракционную картину, как если бы телескоп был остановлен до размера вторичной звезды. Но помните, что оно заложено как крошечная поправка к более крупному паттерну, окружающему его. Таким образом, дифракционная картина маленькой тени не видна как отдельная сущность, но она вызывает достаточно грубые изменения, чтобы разрушить кружевообразные изменения, видимые на расфокусированном диске беспрепятственной апертуры (см. рис. 1-4 или 1). -5).

Другая особенность рисунка 2-1 — небольшое яркое пятно в центре расфокусированных теней. Интересно, что успешное наблюдение таких пятен является частью экспериментального подтверждения волновой теории света. Когда Френель впервые представил свою статью по волновой теории Французской академии в 1818 году, одним из слушателей был С.Д. Пуассон, ярый противник описания света как волны (он был сторонником теории волн как света).

(теория лучей как частиц). Он использовал новую теорию дифракции Френеля, чтобы показать, что в некоторых местах в тени круглого препятствия должно появляться яркое пятно. Пуассон думал, что такой нелепый вывод раз и навсегда уладит бред о световых волнах. Каково же было его огорчение, когда вскоре это место было обнаружено. На самом деле оно было обнаружено задолго до этого, и сообщение ускользнуло от внимания теоретиков оптики. Это маленькое яркое пятно до сих пор называется *Пятно Пуассона*.

Пятно, показанное здесь, представляет собой комбинацию центрального пятна, ожидаемого от полной апертуры, и внутренней отрицательной апертуры. Однако пятно Пуассона можно наблюдать даже без использования внешней апертуры, просто аккуратно расположив круглую тень в луче света, расходящемся из точечного отверстия.

focused OB=30%



out-of-focus OB=30%

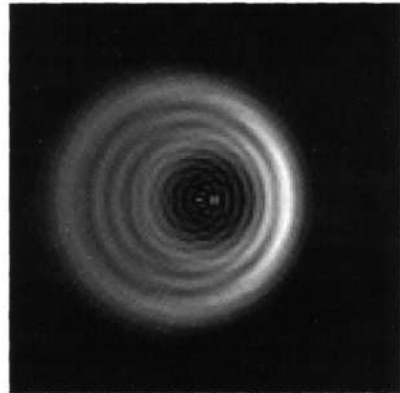


Рис. 2-2. Несоосность. *Сильно смещенный отражатель со вторичной закуркой 30%. Слева — сфокусированное изображение, справа — то же изображение в расфокусированном виде. Увеличение сфокусированного изображения в 6 раз больше, чем расфокусированного.*

2.2.2 Несоосность

Несоосность можно обнаружить с помощью звездного тестирования. Фактически, прежде чем тестирование можно будет продолжать дальше, оптика должна быть правильно коллимирована. Эта процедура будет описана более подробно позже, но на рис. 2-2 изображен типичный смещенный ньютоновский телескоп. Область хорошего изображения может находиться за пределами диафрагмы окуляра с большим увеличением в смещенном телескопе. Отклонения от перекоса легко исправить, поэтому не следует встречать их появление с чувством страха. Если предположить, что со стеклом все в порядке, такие aberrации исчезнут в центре поля зрения при правильном выравнивании.

Сфокусированное изображение имеет небольшой астигматизм, но в основном показывает

последствия комы. Слово *кома* происходит от латинского слова, что означает «волосы», а также является корневым словом знакомого астрономического термина *комета*. В тяжелых случаях кома растягивает изображение на две структуры крыла.

2.2.3 Атмосферное движение ионов и турбулентность

Еще одна тревожная аберрация изображения вызвана прохождением волнового фронта через множество ячеек атмосферной турбулентности, занимающих длинный воздушный цилиндр перед инструментом. Эта воздушная трубка всегда является частью земной оптической системы. Рефракция в воздухе очень мала, но она существует. Оно меняется в зависимости от температуры и давления.

Горячий воздух легче холодного, и способность воздуха преломлять свет увеличивается с увеличением плотности. Различия в плотности также приводят к фундаментальной нестабильности атмосферы. Солнечный свет в основном нагревает землю, оставляя мало энергии в любом конкретном объеме воздуха при его прохождении через атмосферу. Горячая земля нагревает воздух над ней, и более теплый воздух становится менее плотным. Холодный воздух над ним падает, а теплый воздух поднимается и занимает тот же объем, что и холодный воздух, образуя временный вихрь. В какой-то момент снижение давления охлаждает поднимающийся теплый воздух, а падающий холодный воздух нагревается по противоположной причине. Два объема воздуха только что поменялись местами. Земля теперь немного прохладнее, а оба объема воздуха немного теплее. Возможно, верхний объем воздуха станет нестабильным по отношению к еще большему объему воздуха.

Неэффективность процесса делает разницу температур двух слоев менее значительной, и без дальнейшего нагрева земли процесс замедлится, как старые часы. Такое движение представляет собой невидимый циклический тепловой двигатель, переносящий энергию от горячей земли к прохладным верхним слоям атмосферы. Энергия солнечного света просачивается вверх за счет конвекции через котел воздуха.

В дневное время этот нагрев продолжается. Конвекционные клетки сохраняются, а иногда и растут. Благодаря эффективным свойствам теплопереноса воды и использованию тени, обеспечиваемой облаками, конвекционные структуры могут расширяться до колоссальных размеров — за пределы маленьких клочков и пылевых вихрей, за пределы даже тепловых потоков, используемых парящими птицами. Они могут перерасти в летние полуденные грозы. По краям основных конвективных структур расположены мелкомасштабные ячейки, а по краям этих маленьких ячеек — еще более мелкие ячейки, пока вихри не исчезнут в бурлящей турбулентности микроскопических масштабов.

Неудивительно, что солнечные наблюдения обычно лучше проводить утром, пока земля еще не сильно нагрелась. Дневной тест с использованием изображения Солнца в отражающей сфере лучше всего проводить самым ранним утром. Кроме того, турбулентность сильна везде вблизи облаков, поскольку облака

флаг, указывающий на то, что работает одна из этих гигантских тепловых машин.

Однако больше всего нас беспокоит ночь. Без солнечного света, который бы стимулировал этот процесс, конвекция должна полагаться на остаточное тепло земли или потоки в атмосфере, вызывающие массы воздуха с разными температурами. В какой-то момент ясной ночи земля охлаждается за счет теплового излучения и имеет более низкую температуру, чем воздух над ней. Поскольку холодный воздух плотнее теплого, этот результат более стабилен. Конвективные ячейки в ясные ночи менее впечатляющи. Через отверстия, расположенные рядом с глазом человека, этот эффект виден как легкое распространение или скопление света — звездное «мерцание». При использовании больших апертур, например телескопа, эффект редко проявляется в виде изменения яркости. В небольших телескопах изображение прыгает; в более крупных инструментах изображение фиксированное, но размытое.

На снимке, полученном при тестировании звезды вне фокуса, такие клетки выглядят не более чем пятнами солнечного света на дне плавательного бассейна. Подгоняемые высотными ветрами, они омывают апертуру.



Рис. 2-3. Воздушная турбулентность. Азамороженный момент турбулентного изображения показан в сфокусированном узоре (слева) и расфокусированном узоре (в центре). Задержка всего на мгновение может показать пример шаблона справа. Сфокусированное изображение увеличивается в 5 раз по сравнению с расфокусированным.

На рис. 2-3 показан моментальный расчет такого шероховатого дифракционного диска. Особое внимание обратите на сфокусированное изображение. Картина дифракции меняется так быстро, что такие явления часто невозможно наблюдать напрямую. По крайней мере, вы можете проследить за изменениями в картине внешнего фокуса, когда клетки быстро перемещаются по передней части телескопа. Наиболее заметное изменение в сфокусированном узоре — это угол, под которым появляются осколки света.

2.2.4 Токи трубки

Еще один атмосферный эффект беспокоит пользователя телескопа. Небольшие телескопы часто переносят из теплого дома на холодную улицу. В наши дни их часто перевозят в места темного неба в теплом автомобиле.

перенесите на некоторое расстояние перед повторной сборкой. Даже стационарно установленные обсерватории редко поддерживают именно ту внешнюю температуру, при которой они будут использоваться. Как следствие, части крепления — и особенно само зеркало — должны остыть.

Стекло обладает высокой теплоемкостью и сопутствующей низкой теплопроводностью. Другими словами, стеклянная оптика способна отводить много тепла и сохранять его в течение длительного времени. Большим зеркалам во всю толщину требуется несколько часов, чтобы остыть.

Конвекция воздуха отвечает за большую часть переноса энергии. При наличии силы тяжести воздух, нагретый более температурными поверхностями в трубе, вытесняется падающим холодным воздухом. В отражателе с открытой трубкой, наклоненном под углом, в результате возникает ток в трубке, как показано на рис. 2-4. Другие эффекты охлаждения видны в оконных рефлекторах и даже в рефракторах, но они могут принимать не именно эту форму.

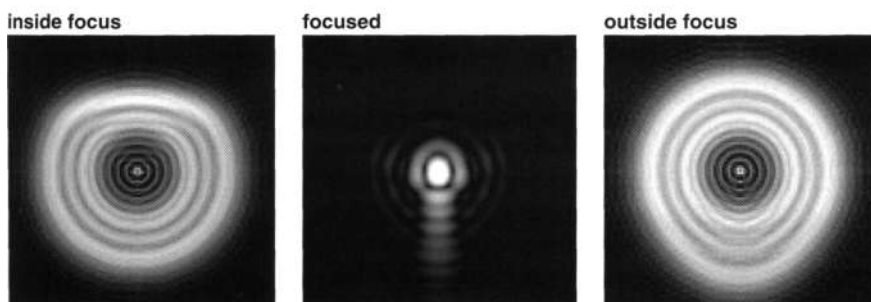


Рис. 2-4. Ток трубки. Распространенным проявлением трубчатого тока является сдвинутая или грыжа доли на одной стороне диска и угловатый вид на другой. Увеличение сфокусированного изображения увеличено в 6 раз.

Нагретый воздух выходит из телескопа, как из дымохода. Обычно он охватывает верхнюю часть трубки при выводе наружу. Поскольку свет проходит быстрее через менее плотный теплый воздух, волновой фронт там скручивается, как переворачиваемая страница. Под определенными углами сфокусированное изображение напоминает луну, садящуюся над тихим морем. После остывания телескопа эти эффекты исчезают.

2.2.5 Защемленная или деформированная оптика

Особенно часто при слишком тугих ячейках рефлектора или тонких зеркалах, изгибающихся под собственным весом, возникает абберация, имеющая вид, показанный на рис. 2-5. Детали деформации изменяют точный рисунок расфокусировки. Эта деформация зависит от того, какой зажим затянут, сколько точек опоры удерживает зеркало, а также от того, опирается ли оптика по краю или снизу. Оно будет меняться при изменении высоты телескопа.

Вкратце, конкретная деформация, смоделированная здесь, приводит к образованию трехстороннего рисунка шипов.

2.2.6 Сферическая аберрация

Если абразив поместить между двумя стеклянными дисками и они будут тереться друг о друга с совершенно случайной ориентацией и длиной хода, чего можно ожидать? В результате тысяч таких растирающих движений должна получиться часть двух сфер — одна выпуклая, а другая вогнутая.

Таким образом, сферы (точнее, сферические чаши) изготовить легко, по крайней мере, по сравнению с другими трехмерными поверхностями. К сожалению, сферы не отображают правильно. Если представить себе полусферический отражатель или сферическую линзу, нетрудно понять, почему.

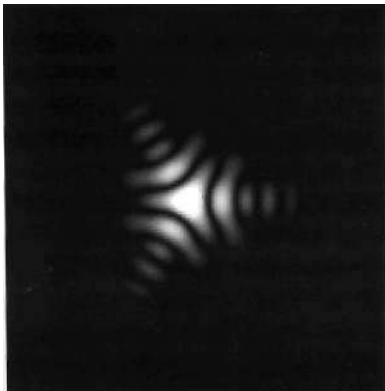
Допустим, лучи света падают на такие поверхности, как на рис. 2-6. Поскольку точка удара отклоняется от прямого попадания по центру, фокус смещается от одной точки. Очевидно, что это отклонение представляет собой постоянную опасность.

Механизмы, которые появились для решения этой проблемы, интересны, поскольку указывают на существенные различия между рефракционной и отражательной астрономической оптикой. Это почти две отдельные линии развития.

В случае рефракторов сферическая линза была сохранена и усовершенствована. В рефракторах оптические поверхности можно располагать близко друг к другу, не мешая друг другу. Более сложные оптические системы могут быть разработаны путем поиска компромисса между кривизной и разделением близко расположенных элементов. Первым оптическим дизайнером, систематически борющимся с аберрациями, был Йозеф Фраунгофер. Его шедевральный инструмент, великий дерптский ахроматический рефрактор, был исправлен не только на сферические и хроматические аберрации, но и на внеосевую кому. Этот инструмент стал образцом для телескопов 1800-х годов, почти так же, как телескоп Хэдли был фундаментальной конструкцией 1700-х годов. Фраунгофер выполнил эту задачу с помощью сферических поверхностей (с небольшой ретушью) и умного дизайна. Вариации двухэлементных дублетных рефракторов Фраунгофера с воздушным пространством продаются сегодня и до сих пор дают выдающиеся изображения.

Телескопы-рефлекторы пошли по другому пути. Если вы поместите линзу очень близко к зеркалу, свет пройдет через нее дважды, что может быть полезно, а может и нет. Были сконструированы зеркальные телескопы задней поверхности (действительно, один из них был предложен самим Ньютоном в *Оптика*, п. 105), но обычно они специализируются на инструментах, конструкция которых сложна. Цельносферические рефлекторы не являются невозможными, но пришлось ждать появления сложных смешанных линзово-зеркальных систем (таких как телескоп Максудова). Производители рефлекторов довольно рано обратились к асферической оптике.

сосредоточенный



Вне фокуса

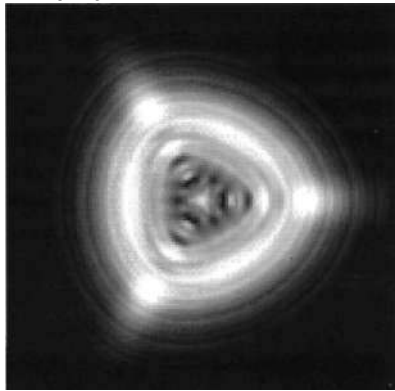


Рис. 2-5. Деформированная оптика. Трехлепестковый узор, возникающий в результате слишком тугих зажимов зеркала или тонкого зеркала, которое не поддерживается должным образом. Слева: сфокусированный узор. Справа: слегка расфокусированный диск. Сфокусированный узор расширен в 2,5 раза.

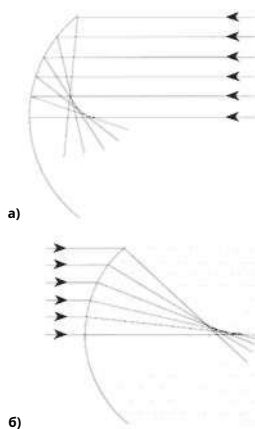


Рис. 2-6. Сферическая aberrация в отражателях(а) и рефракторы(б).

Асферическая поверхность для однозеркального астрономического телескопа представляет собой параболу, вращающуюся вокруг своей оси, как при ор. Эта трехмерная поверхность называется «параболоидом». К сожалению, параболидаальная поверхность не возникает случайно. Создатель должен взять более или менее статистический процесс формирования сферы и управлять им (с помощью давления, специальных ударов или небольших инструментов), чтобы деформировать поверхность до парабоида. Были изобретены двухзеркальные системы, для которых требуется все: от гиперболидов до сплюснутых сфероидов.

Асферизация требует хороших стендовых испытаний и понимания материалов и методов. Как можно было бы предположить, некоторые производители телескопов более добросовестно относятся к таким операциям, чем другие. Смола, которую используют для полировки и придания формы поверхности, является одним из самых сварливых материалов, используемых в любом процессе. Изготовление может пойти не так, если смола используется неважительно.

По моему опыту тестирования примерно 100 номинальных параболюидов, около половины коммерческих зеркал были немного недокорректированы. Их поверхность находится где-то между сферой и параболюидом, едва в пределах допуска или немного за его пределами. Четверть зеркал была сильно недокорректирована, а около четверти были изображены в допустимых пределах. Большинство недокорректированных зеркал были короткофокусными, от $f/4$ до $f/6$. Почти все параболюиды с диафрагмой от $f/6$ до $f/8$ были адекватно прорисованы. Я видел несколько коммерческих ньютоновских зеркал, которые были подвергнуты чрезмерной коррекции, хотя многие зеркала любительского изготовления, похоже, таковыми являются.

Для опытных оптиков изготовить параболюидные зеркала не так уж и сложно. Поскольку зеркала ньютоновских телескопов имеют тенденцию быть недостаточно скорректированными, производители должны тратить как можно меньше времени на каждое зеркало. Эту практику, возможно, можно объяснить (если не оправдать) нынешними низкими ценами на потребительские зеркала. Производители пытаются рассчитать зеркала с точностью до допуска, минимизируя время и затраты. Неизбежный статистический разброс означает, что многие такие зеркала будут неприемлемы.

Недокоррекция показана на рис. 2-7. Внутри фокуса большая часть света собирается во внешнем кольце. За пределами фокуса он сместился к нечеткому участку в центре или за пределами вторичной тени. Это признак недостаточной коррекции. Запомните эти шаблоны. Если у вас есть возможность протестировать ньютоновцы, вы неоднократно будете видеть недокоррекцию, и это достаточно часто встречается в других типах телескопов. Сферическая аберрация — пожалуй, единственная настоящая ошибка стекла, которую вы когда-либо увидите. Остальные обычно смешиваются.

Некоторые люди могут ошибочно истолковать общий тон этих комментариев как осуждение ньютоновских рефлекторов. Ничего подобного не предполагается. Два лучших телескопа, которые я когда-либо видел (включая рефракторы), были изящными ньютоновцами. Четкие изображения звезд хорошо сделанного и выровненного параболюида представляют собой прекрасное зрелище. Жаль, что многие из них не работают так хорошо, как могли бы.

2.2.7 Шероховатые поверхности

Еще одна распространенная аберрация, от которой страдают телескопы, — это шероховатость поверхности. Это является результатом использования быстрополирующих материалов и поддержания недостаточного

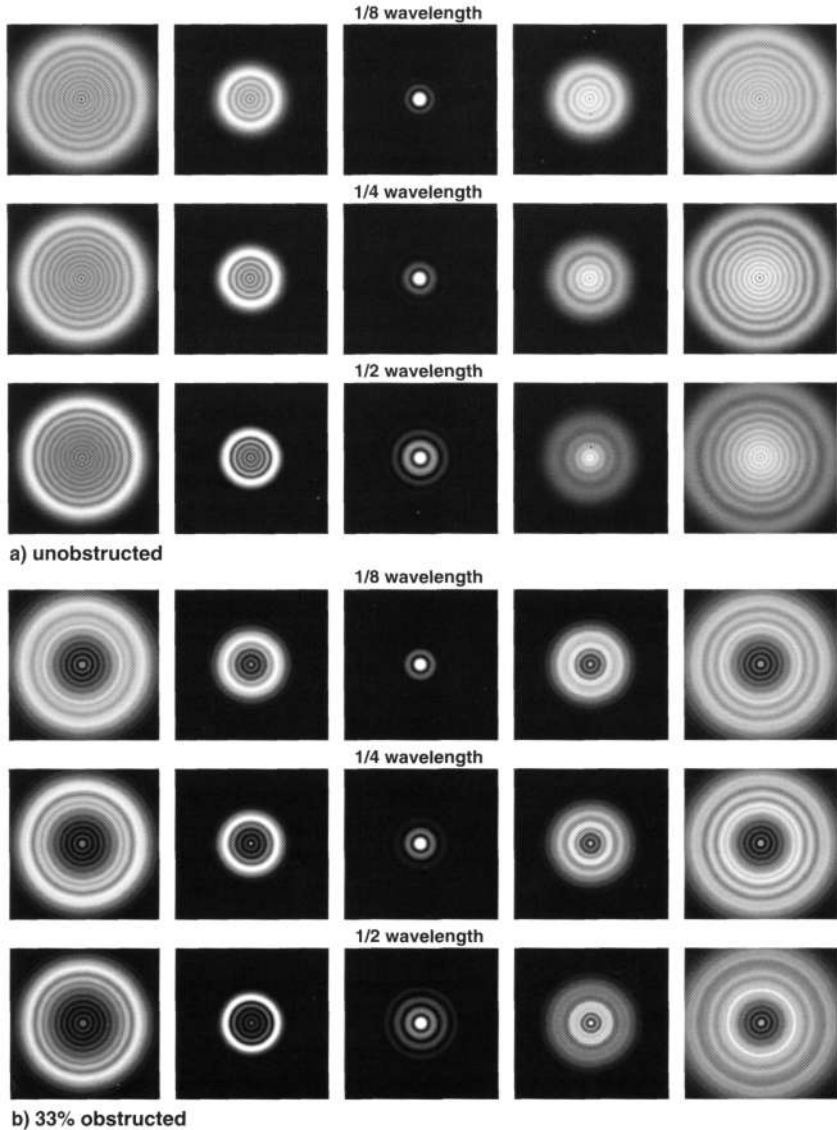


Рис. 2-7. Сферическая абберация. Под коррекцией появляются а) свободные апертуры и б) 33% закрытых апертур. Внутренний фокус (слева): большая часть света собирается в сильное внешнее кольцо, оставляя тусклый центр. В центре: сфокусированное изображение постоянно ухудшается по мере увеличения абберации. Вне фокуса (справа): внешняя сторона изображения тускнеет, а недостающий свет обнаруживается ближе к центру. (Увеличение сфокусированного изображения в 4 раза больше, чем у расфокусированного.)

прямой контакт между полировальным притиром и обрабатываемой оптической поверхностью. Полировка – странный и деликатный процесс. Переходные условия на поверхности притира могут изменить контакт между инструментом и оптикой. Если поверхность отполировать вручную, можно почувствовать, как инструмент хватается и бьется почти как живое существо. Работники ручного труда сразу понимают, что что-то не так, и могут повторно смочить притир полировальной пастой и нажимать до тех пор, пока контакт снова не установится.

С точки зрения экономики, оптика нечасто обрабатывается вручную. Зеркало телескопа стоимостью 300 долларов, вероятно, потребует от 2 до 4 часов времени оптика. Такую работу необходимо выполнять быстро с помощью машин, иначе стоимость зеркал телескопов быстро вырастет и станет недоступной для потребителей. Когда круг начинает заедать, машина этого не замечает и не заботится. У него достаточно мощности, чтобы преодолеть скрипящие колени. Если оптик не разработал процедуру, позволяющую избежать подобных трудностей, одним из возможных последствий может стать шероховатость поверхностей.

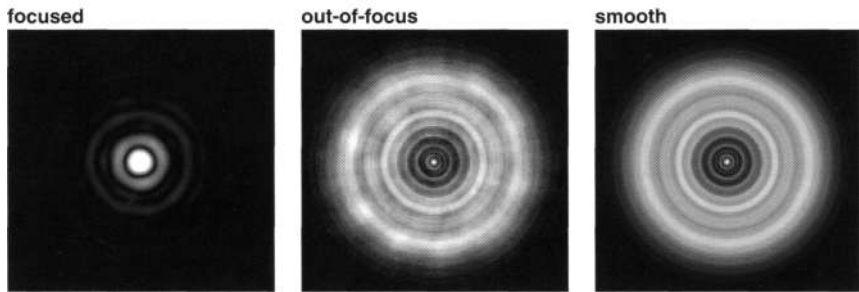


Рис. 2-8. Шероховатость. *А* – небольшая шероховатость поверхности. Слева: сфокусированное изображение. В центре: расфокусированное изображение шероховатой поверхности. Справа: гладкое расфокусированное изображение для сравнения.

На рисунке 2-8 приведен пример поведения света на картине дифракции от чрезмерно шероховатой поверхности. Разумеется, проиллюстрирован только один такой внешний вид. Рисунок зависит от таких деталей, как масштаб шероховатости, а также ее зернистость и периодичность. Эти узоры, если страница находится на достаточном расстоянии, проявляют слабый остроконечный эффект. Эти пики можно отличить от неровностей атмосферы по их неподвижному виду. Атмосферная турбулентность меняется. В результате шипы вылетают то с одной стороны изображения, то с другой. Однако шероховатые поверхности остаются хладножесткими. Тем не менее, небо обычно недостаточно устойчиво, чтобы проверить эту проблему на реальной звезде; чаще всего это ошибка, которую лучше доверить наземному искусственному источнику.

2.2.8 Зональные aberrации

Частью успеха оптической поверхности является эффект статистического усреднения. Одна из самых парадоксальных особенностей оптической работы заключается в том, что лучшие поверхности являются результатом на первый взгляд небрежной практики. Однако за вариациями скрываются тщательно очерченные границы.

Машины менее случайны. Оператор должен внести коррективы, чтобы добавить к обводке псевдослучайную составляющую. Если на машину наложены недостаточные искусственные изменения, она будет иметь тенденцию рыть круглые борозды или волнистые деформации, называемые зональными дефектами, на оптической поверхности. Зоны также могут быть результатом использования небольших полиров на большей оптической поверхности. Использование небольших полиров без достаточного смешивания может привести к образованию зон как в оптике ручной, так и в машинной оптике. См. рис. 2-9.

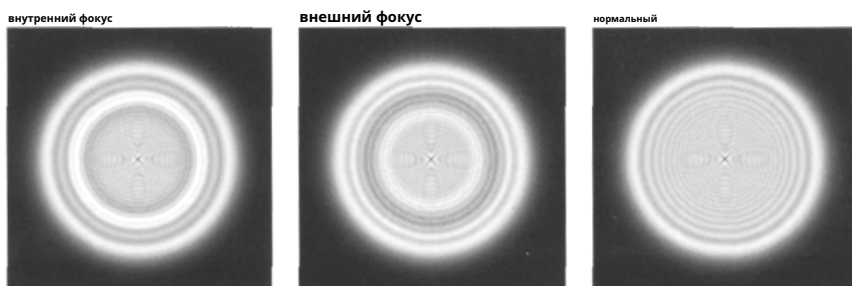


Рис. 2-9. Зональный дефект. Зональная aberrация на беспрепятственной апертуре, вызванная канавкой на 60% радиуса диска. Зона появляется далеко внутри фокуса. как яркое кольцо на однородном диске, а снаружи оно становится темным кольцом. Справа — неабerrированный паттерн.

Зональные дефекты распространены в маленькой оптике в центре. Они выглядят как углубление или выпуклость (примером является фотография на рис. А-3 Приложения А). Зоны в центре менее вредны, чем зоны, возникающие на других радиусах. В закрытых рефлекторах они в основном ограничиваются тенью диагонали и становятся безвредными. Даже если они и проявляются, дефекты в центре занимают лишь небольшую часть площади поверхности.

2.2.9 Загнутые края

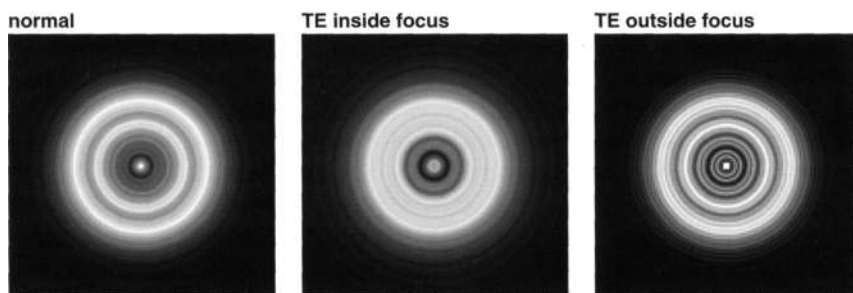
Загнутый край – это дефект, при котором край не заканчивается резко, а постепенно загибается. Этот особый случай зональной aberrации приводит к удивительно большому повреждению изображения, поскольку край апертуры занимает большую часть общей площади поверхности. Он отражает больше света.

Повернутый край возникает либо из-за слишком мягкой полировочной смолы, либо из-за неправильного давления, когда оптическая поверхность вытянута за пределы оптической поверхности.

край полирующего инструмента (Tehereau 1984). Его чрезвычайно трудно удалить после того, как он образовался, и страх перед этим заставляет производителей телескопов чрезмерно компенсировать это чрезвычайно жестким шагом. Некоторые добавляют примеси, которые изменяют готовность смолы к течению. Однако твердая или восковая смола часто усугубляет проблемы с шероховатыми поверхностями, поэтому конечный эффект представляет собой компромисс между двумя вредными аберрациями.

В идеальном рефлекторе загнутый край проявляется как смягчение кольцевой структуры внутри фокуса и соответствующее ужесточение кольцевой структуры вне фокуса. Чтобы избежать путаницы, ищите этот эффект через ярко окрашенный фильтр. На рис. 2-10 показаны две апертуры 25%: одна нормальная, другая с загнутой кромкой. Свет, неправильно направленный от загнутого края, выглядит как туманное свечение вблизи изображения внутри фокуса (удалите фильтр, если ищите этот ореол).

По обе стороны от фокуса узкий загнутый край отображает довольно ровное распределение света на диске.



инжир 2-10. ОтключеноКрай. Повернутый край при закрытой на 25% апертуре. Слева появляется нормальная диафрагма 25%. Диск внутри фокуса демонстрирует потерю контраста и рассеянное свечение вокруг него. Внефокусный диск кажется менее затронутым с точки зрения светораспределения, но контрастность в кольцах увеличивается.

2.2.10 Астигматизм

Чистый астигматизм может возникнуть даже в идеальных телескопах (особенно в рефракторах), если система не отрегулирована должным образом. Лечение простое: аберрация быстро исчезает после коллимации телескопа. Это также происходит в ньютоновских телескопах с изогнутыми вторичными зеркалами. Из-за наклона предположительно плоского зеркала на 45° выпуклая или вогнутая диагональ будет выражаться на изображении как астигматизм.

Астигматизм самого стекла вызван тремя ошибками изготовления. Это может произойти в результате прижатия диска к цилиндрической поверхности — например, задняя поверхность диска может быть не плоской. Другая причина — слишком быстрое охлаждение стеклянного диска при его заливке, замораживание не снимаемых напряжений.

в диск. Эту ошибку редко можно увидеть на специально изготовленных оптических дисках, но она достаточно распространена в иллюминаторах или другом незарегистрированном стекле. И наконец, если оптический диск не поворачивается относительно инструмента, цилиндр притирается непосредственно к диску.

Во всех случаях на расфокусированных астигматических изображениях будут видны два овальных рисунка, расположенных под углом 90° друг к другу (см. рис. 2-11). Если астигматизм серьезный, при определенных положениях фокусировки звездные изображения будут выглядеть как прямые линии.

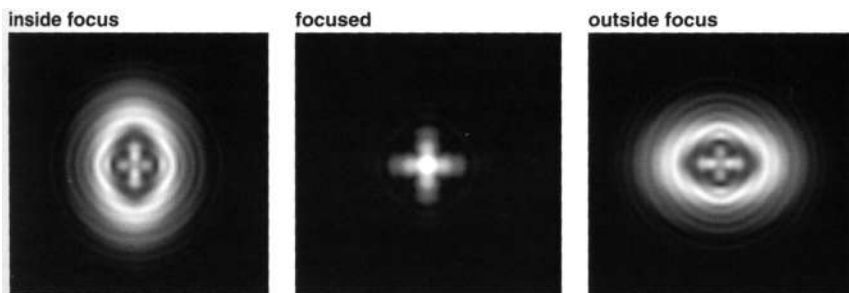


Рис. 2-11. Астигматизм. Появление астигматизма сразу по обе стороны от фокуса. Середина: в лучшем случае узор представляет собой крест. Не в фокусе профиль растягивается в овал, причем направление растяжения меняется на четверть оборота по разные стороны фокуса.

В лучшем случае астигматизм покажет указанный перекрестный узор. В небольших количествах наблюдается утолщение первого дифракционного кольца в поперечных направлениях.

2.3 Заключительные замечания

Эта глава задумана лишь как краткий обзор огромного ландшафта, который можно обнаружить во время звездного испытания. Не путайте это шапочное знакомство с реальной экспертизой. Масштабы и сложность звездного испытания поражают. Вы продолжите изучать новые возможности звездного теста еще много лет в будущем.

Размер предыдущих разделов является одним из показателей важности, придаваемой им как оптическим проблемам. Если какую-то тему и можно рекомендовать для изучения, то это сферическая аберрация, т. е. простая коррекция ошибки. Станьте экспертом в его обнаружении. Вы будете видеть эту ошибку снова и снова.

Глава 3

Телескопы — это фильтры

Телескоп – это устройство, воспроизводящее изображение реальности. Он не пишет на бумаге, как копировальный аппарат, но его изображения столь же нереальны. Он создает свое воспроизведение на крошечной плоскости изображения всего в нескольких сантиметрах от кончика носа наблюдателя. Исследование осуществляется с помощью мощной увеличительной линзы, называемой окуляром. Только благодаря множеству отображаемых значений (местоположение, цвет, яркость) и избирательной мощности визуальной обработки человеческого мозга это воспроизведение интерпретируется как реальность.

Точно так же зрительный образ, проецируемый на сетчатку, является лишь отражением реальности. Люди с острым зрением способны получить больше информации о внешнем мире, чем люди со слабым зрением, но каждый человек склонен придавать одинаковое значение этому восприятию, независимо от его абсолютного качества. Мы склонны игнорировать ошибки.

Прежде чем идти дальше, взгляните на рис. 3-1. Думайте о фильтре как о процессе, который ухудшает качество информации, содержащейся в изображении или сигнале. Фильтры — это не только такие объекты, как цветные стеклянные диски, которые можно прикрепить к окуляру. Это все, что удаляет информацию из изображения, даже относительно тонкие факторы, такие как ограничение диафрагмы и длина волны видимого света. Эта концепция, которую я называю «шаткой стопкой», представляет собой частичный список фильтров между наблюдателем изображения и реальностью. Некоторые из изображенных нитраций не являются независимыми. Например, аберрации окуляра могут, по счастливой случайности или замыслу, частично компенсировать аберрации основного инструмента.

Эффект каждого из этих фильтров можно уменьшить, но не все можно устранить. Например, можно избежать атмосферной турбулентности, отправившись в космос. Можно уменьшить ошибки аберрации, создав почти идеальную оптику. Можно даже избежать неприятных ошибок системы глаз-мозг, используя более предсказуемую фильтрацию фотографии. Так почему же нельзя было бы нанести абсолютно идеальное изображение Юпитера на лист бумаги?

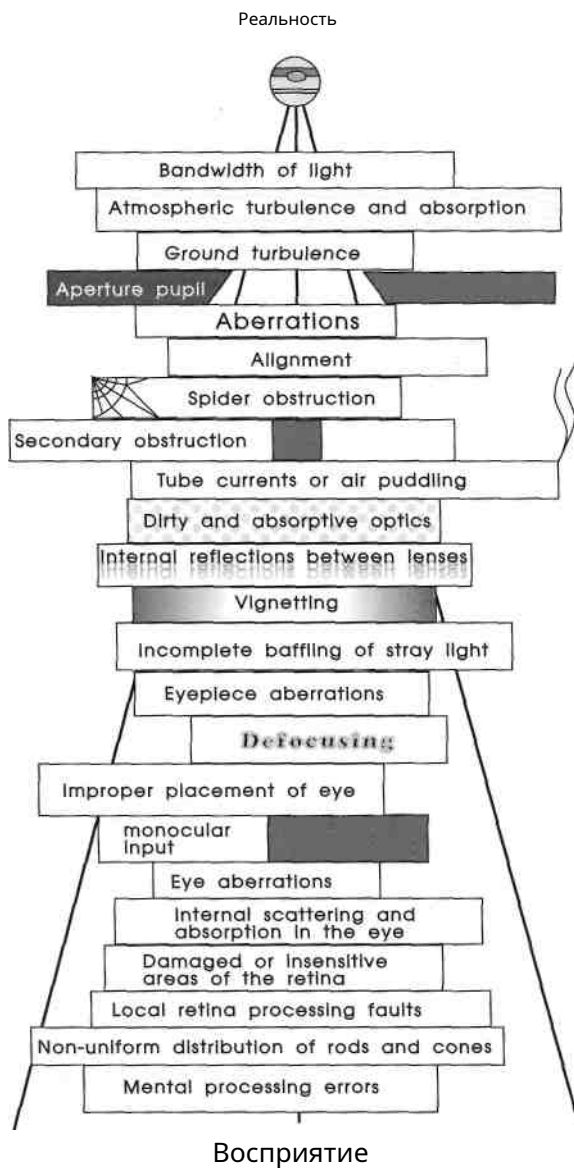


Рис. 3-1. Диаграмма, изображающая некоторые aberrации, препятствия, несовпадения и ошибки обработки, которые могут ухудшить изображение: «шаткая стопка».

фотопленка?

Самая важная форма фильтрации не может быть устранена или уменьшена – фильтрация, вызванная *диафрагмой*, или конечная протяженность окна, через которое смотрит телескоп. Давайте представим, что у нас есть какой-то супер-фильм, записывающий все, что на него проецируется. Далее представьте, что у прибора абсолютно идеальная оптика. Мы полагаем, что если фотографию Юпитера, сделанную такой системой, рассмотреть в микроскоп, мы получим идеальное изображение всего, что находится на расстоянии от Юпитера: вулканов на Ио, крошечных кристаллов льда в атмосфере, мельчайших завитков облачных поясов и т. д. и т. д. Если мы можем сделать это для полноразмерного телескопа, мы можем сделать это и для маленького. Возможно, даже проще сделать идеальную маленькую оптику, чем большую. Если оптика крохотная, что тогда?

Мы достигли фундаментального предела. Маленькие линзы не дают такого же изображения, как большие. Резкость изображения любой оптической системы ограничена наличием диафрагмы. Если мы протиснем изображение Вселенной через крошечное отверстие, мы должны ожидать, что это изображение будет немного испорчено прохождением. Прохождение света через большие отверстия приводит к меньшему повреждению.

3.1 Восприятие реальности

На рис. 3-1 показано множество ограничений, с которыми мы ничего не можем поделать. Хотя часто используются и другие рецепторы, большинство людей интерпретируют зрение глазного яблока как лучшее представление реальности. Таким образом, мы все посылаем сигнал через неизбежную систему фильтрации, которая прикреплена к нашей голове. Некоторые могут возразить, что такая фильтрация присутствует всегда и ее можно рассматривать как своего рода базовый уровень. Правда, мы, вероятно, привыкли к нашему собственному зрению, но нам больше всего знакомо его действие при ярком свете, с использованием двух глаз. В телескопе с низкой освещенностью и монокулярным зрением многие ошибки, которые в противном случае были бы случайными, усугубляются, пока не приводят к значительной и неожиданной потере информации.

Единственное, что можно сделать с такими неизбежными ошибками, — это осознавать их и использовать стратегии для уменьшения их последствий. Например, наиболее часто используемой мерой по исправлению неуклюжего расположения датчиков слабого освещения на сетчатке является не смотреть прямо на тусклые объекты, т. е. использовать боковое зрение. Дисбаланс, вызванный монокулярным наблюдением, можно устранить с помощью бинокля.

Фильтры, описанные в этой книге, сосредоточены в центре стопки, от атмосферы до изображения, наблюдаемого в окуляр. Это не означает, что это худшие источники ошибок, но это фильтры, наиболее связанные с телескопом, его окружением и его использованием. Это те формы фильтрации, на которые мы больше всего можем повлиять корректирующими действиями.

Окулярами здесь пренебрегают. Хотя замена окуляра меняет оптическую систему, обычно это не самый серьезный источник оптических проблем. Если используется большое увеличение, ошибки первичной оптики будут доминировать, если только окуляр не полностью неисправен или он не используется для необычно крутого светового конуса телескопа с низким фокусным соотношением. Также плохой окуляр можно определить, опробовав его на нескольких инструментах.

Отклонения, которые могут показаться менее важными, охвачены, поскольку они обычно вызваны конструктивными особенностями конкретного инструмента или повторяющимися плохими привычками использования. Например, если вы храните свой телескоп в жарком сарае и пользуетесь им только ранним вечером, вас будут беспокоить токи в трубе. Телескопы со смещением редко выравниваются лучше при следующем использовании. Оптика не лечится сама по себе.

Очевидно, что наиболее желательным изображением было бы взаимно однозначное отображение точек реального объекта в точки на изображении. Телескопы уже нарушают этот принцип, сжимая большую часть трехмерной Вселенной до двумерной плоскости или слегка искривленной поверхности. Только для близлежащих объектов изображения растягиваются в трехмерное пространство изображений. Таким образом, газовое облако на расстоянии 500 световых лет изображено на вершине гигантской звезды, видимой на расстоянии 200 световых лет от него. Люди привыкли к этому эффекту и склонны его игнорировать. Только там, где у нас есть независимые знания о трехмерном размещении объектов, такое сжатие становится нежелательным. Многие люди знакомы с подобным эффектом сжатия перспективы, когда используют бинокль на спортивном мероприятии. Если они находятся достаточно далеко от места событий, поле кажется сплюснутым до игровой площадки на несколько шагов в глубину.

Для большинства целей фильтрация, вызванная сжатием изображения на лист, не является вредной. На самом деле, эта и другие формы фильтрации могут быть весьма полезны. Астрономические телескопы не беспокоит исчезающе малая глубина резкости, столь неприятная в микроскопии, когда только часть объекта видна в любом фокусе.

Еще одним положительным применением фильтров является то, как эмиссионные туманности высвечиваются из свечения неба с помощью узкополосных небулярных фильтров. Хотя такие фильтры немного ослабляют интересный сигнал, они значительно уменьшают наложенный шум свечения неба. Наблюдатель рад принять несколько более слабое истинное изображение в обмен на устранение искусственного света.

3.2 Сравнение с аудио

Поскольку обобщенная фильтрация на первый взгляд представляет собой сложную концепцию, давайте воспользуемся примером, в котором идеи фильтрации встречаются в нашем обычном словаре — коммерческой звуковой системе (см. сравнения в таблице 3-1). Потому что электроника — более позднее изобретение, чем телескопы, а терминология для звука была изобретена инженерами, специализирующимися на математике обработки сигналов.

Эматика, многие современные слова, используемые для обозначения звуковых систем, обычно имеют встроенные концепции фильтрации. Многие люди знакомы с аудиооборудованием или имеют поверхностное понимание слов. Можно провести сравнения или, по крайней мере, некоторые натянутые аналогии с аналогичными закономерностями фильтрации телескопов. В аудиоописаниях частота 20 000 циклов в секунду или 20 000 Гц равна 20 килогерцам, сокращенно «кГц».

Таблица 3-1
Обобщенные фильтры телескопа и связанного с ним оборудования, которые ведут себя аналогично другим фильтрам. устройство воспроизведения, высококачественная звуковая система.

ФИЛЬТРАЦИЯ (телескоп/глаз/камера)	ФИЛЬТРАЦИЯ (аудиосистема)
диаметр апертуры	размер динамиков
цветные фильтры	фильтры эквалайзера
Обработка изображения	обработка сигнала
рассеянный свет	звуковой шум
пространственный отклик	частотная характеристика

3.2.1 Диаметр апертуры/размер динамиков

Типичная стереосистема имеет каскадный набор устройств воспроизведения звука, называемых динамиками. *преобразователи*. Они преобразуют электрическую энергию в звуковые волны сжатия воздуха. Типичная стереосистема подразделяет динамики как минимум на два диапазона: «низкочастотные динамики» и «высокочастотные динамики». Низкочастотные низкочастотные динамики довольно большие, а высокочастотные высокочастотные динамики, как правило, очень маленькие.

Низкочастотные динамики, которым приходится пропускать большое количество воздуха, иногда перемещаются на большие расстояния и имеют огромные диаметры. Движение высокочастотных динамиков вообще невозможно визуально ощутить, и кажется, что они хорошо работают в небольших размерах. Большинство людей полагают, что причина, по которой частотный диапазон разбит на несколько преобразователей, заключается в том, что ни один динамик не может охватить этот диапазон, что в основном верно. Однако мы легко можем представить, если не построить, один динамик, который воспроизводил бы весь частотный диапазон с одинаковой легкостью. Почему мы все еще ожидаем, что спикеры разделятся?

Плоские динамики (и оптика) передают энергию в угловом диапазоне в зависимости от того, сколько длин волн проходит через апертуру. Скорость звука составляет около 330 метров в секунду или около мили каждые 5 секунд. Звук частотой 880 Гц, или 880 циклов в секунду, будет иметь длину волны $\lambda = 330/880$ или $\lambda = 3/8$ метра. Если бы у нас был динамик такого размера, около 15 дюймов, он бы излучал большую часть энергии частотой 880 Гц в диффузоре 120° . Другими словами, это вдвое больше угла 60° равностороннего треугольника, 1 длина волны поперек динамика у основания, 1 длина волны с каждой стороны. Этот размер эффективен для стереоизображения, поскольку звук может широко распространяться по комнате. Итак, мы закончили разработку динамика, верно?

Рассмотрим на минутку наш воображаемый универсальный динамик. Он отлично работает на частоте 880 Гц, но мы слышим частоты примерно в 20 раз выше, примерно до 17600 Гц. Молодые люди могут слышать более высокие звуки, а пожилые — более низкие. Теперь длина волны 17,6 кГц составляет 18,8 мм (около $\frac{3}{4}$ дюйма). Конус энергии, исходящий из того же самого динамика, имеет в два раза узкий угол в длинном тонком треугольнике с 20 длинами волн в основании и 1 длиной волны в высоте — менее 6° . На высоких частотах угловой разброс нашего единственного динамика настолько узок, что нам нужно тщательно нацелить такой источник, чтобы услышать его напрямую. Хуже того, микс частот зависит от того, находимся ли мы прямо перед динамиком или сидим сбоку, ведь каждая частота имеет свой диффузор. Трудно найти «золотую середину» лучшего стереоэффекта. Высокая музыка из такого динамика может восприниматься одновременно только одним ухом и может меняться в зависимости от движения головы. Звукорежиссеры до сих пор проектируют системы с несколькими динамиками разных размеров, поскольку ни один динамик не может воспроизводить звук под оптимальным углом на всех частотах. По этой причине они также разрабатывают динамики других форм. Плоская форма иногда не лучшая форма для оратора.

Однако то, что раздражает в звуковой системе, желательно в телескопе. Типичная телескопическая апертура составляет 200 мм, или 360 000 длин волн в поперечнике. Мы по-прежнему используем грубую оценку угла энергетического конуса, аналогичную той, что давал оратор выше, — вдвое узкий угол тонкого треугольника высотой в одну длину волны и $3,6 \times 10,5$ длины волн поперек основания. Диаметр этого конуса составляет менее 1,2 угловых секунды. Таким образом, большая часть энергии звезды, обнаруженной 200-мм визуальным телескопом, может быть обнаружена в угле, ограниченном менее 1,2 угловых секунд.

Из этих аргументов в пользу разрешения также можно понять, почему расположение сабвуфера (очень низкочастотного динамика) не имеет значения. На типичной частоте сабвуфера, скажем, 33 Гц, длина волны равна $\frac{330}{33}$, или 10 метров. Любой сабвуфер размером меньше железнодорожного вагона не может даже претендовать на то, что способен направить звук в каком-либо определенном направлении. Расположение сабвуфера не имеет большого значения, поскольку он излучает звук во всех направлениях. Слушатель также не способен услышать его в определенном месте; Звук имеет такую низкую частоту, что нормальное восприятие двумя ушами искажается акустической передачей непосредственно через голову.

Точно так же радиотелескопы должны быть огромными, чтобы обеспечить любое разрешение. Телескоп диаметром 20 см (8 дюймов) имеет апертуру всего лишь около одной длины волны линии длиной 21 см, которую часто наблюдают радиоастрономы. Если бы кто-то был настолько глуп, чтобы построить одноэлементный 8-дюймовый радиотелескоп, точечное изображение с излучением в 21 см занимало бы широкий, нечеткий угол в 120° .

3.2.2 Цветные фильтры/фильтры эквалайзера

Фильтры эквалайзера часто добавляются в звуковые системы для компенсации затухания или реверберации помещения. Грубым эквивалентом в телескопе является добавление цветных фильтров в оптическую систему. Цветные фильтры выполняют аналогичный сдвиг или выделение частотного спектра.

Это не прихоть и не случайность, что звуковую подпись отдельной комнаты называют «голосом комнаты». *окраска*. Звуковые помещения с необычно высоким уровнем поглощения обивки или занавесок называются «теплыми», что означает, что они поглощают высокие частоты гораздо сильнее, чем низкие. Красный и оранжевый цвета еще называют «теплыми». Лекарство от теплого звукового пространства — усиление высоких частот. Точно так же, когда мы используем синий фильтр на Марсе, нам легче увидеть высокие пылевые облака, потому что они отражают больше синего солнечного света, чем красноватая марсианская поверхность.

Сам мозг действует как компенсирующий фильтр для внешнего мира. Со времен Эдисона слушатели неоднократно заявляли, что их современная аудиотехнология идеальна, даже когда она была нечеткой и нечеткой. Наше восприятие света столь же сомнительно. Мозг автоматически адаптирует практически любой цветовой баланс, который он видит, к цветовому балансу, который он воспринимает под Солнцем.

Хорошим примером является освещение при искусственном освещении. Загляните в освещенную флуоресцентными лампами комнату снаружи. Ваш цветовой баланс поддерживается более ярким естественным солнечным светом, поэтому свет в комнате, который вы видите внутри, зеленоватый. Освещение парами ртути состоит (в основном) из двух чистых цветов: зеленой линии и сине-фиолетовой. Даже в этих необычных условиях глазу удается обмануть нас большую часть времени. Только когда глаз сталкивается только с одним цветом, он сдается. Даже тогда, я подозреваю, если вы дадите системе глаз-мозг достаточно времени, она в конечном итоге приспособится воспринимать любой отдельный цвет как своего рода размытый серый цвет.

3.2.3 Обработка изображений/обработка сигналов

Существует так много методов обработки аудиосигналов и изображений, что все они не могут быть включены сюда. Давайте посмотрим на пример — передискретизацию.

Шестнадцатититбитные числа записываются на компакт-диск (CD) со скоростью 44,1 кГц, и они считываются с носителя с одинаковой скоростью. Затем значения передаются в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который принимает числа и «отменяет» их обратно в напряжение, которое, как можно надеяться, является разумной симуляцией исходного записанного сигнала.

Можно было бы подумать, что частоты 44,1 кГц будет более чем достаточно для воспроизведения звука с частотой менее половины этой частоты, но оказывается, что этого едва достаточно. Если исходный сигнал имеет частоту 11 кГц, частота дискретизации 44 кГц.

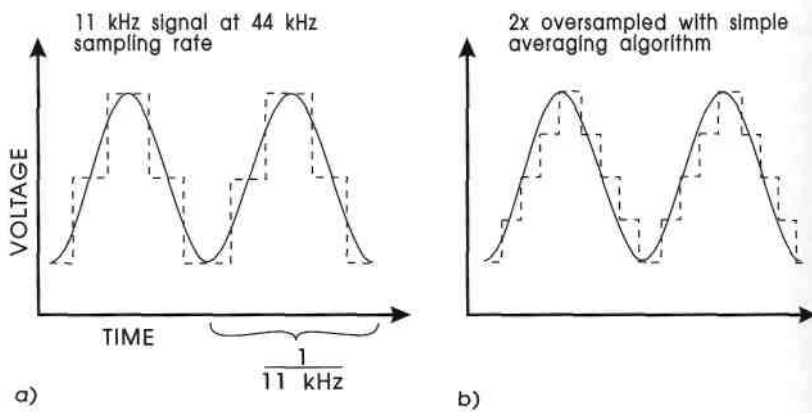


Рис. 3-2. Дискретизация цифровых аудиосигналов.

дает только четыре значения на волну (см. рис. 3-2а). ЦАП пытается создать прерывистую ступенчатую структуру, которая не очень хорошо имитирует исходный синусоидальный тон. Ступенька богата более высокими частотами, называемыми гармониками, от 22 кГц и выше. Более экзотические комбинации форм сигналов могут фактически создавать артефакты, которые перейдут на слышимые частоты.

Можно использовать электронные аналоговые фильтры для подавления частот ЦАП 20 кГц и выше, но для создания резкого среза за пределами определенной частоты требуется чрезвычайно сложная (то есть дорогая) электроника. Недорогие аналоговые фильтры нижних частот ослабляют звук со скоростью, например, 12 дБ/октаву, или в 16 раз при каждом удвоении частоты. Другими словами, идеальный усилитель, питающий один из этих фильтров нижних частот с интенсивностью 1 на частоте 11 кГц, имеет интенсивность $1/16$ на частоте 22 кГц и $1/256$ на частоте 44 кГц. К сожалению, часть ослабления попадает в слышимые частоты. Кривая отклика неприемлема для высококачественного воспроизведения звука.

Часто используемое решение состоит в цифровой «передискретизации» сигнала. Используется ЦАП, работающий на частоте 88,2 кГц, а частота дискретизации сигнала вдвое превышает обычную. Использование цифрового фильтра с алгоритмом интерполяции (алгоритм – модное слово, обозначающее *рецепт*), можно добиться чего-то вроде пунктирной линии на рис. 3-2б. Тогда можно легко применить аналоговое сглаживание нижних частот с частотой среза 44 кГц вместо более нежелательных 22 кГц. Конечно, настоящие проигрыватели компакт-дисков, вероятно, используют гораздо более сложные фильтры и алгоритмы, чем этот. Эта схема была представлена только для того, чтобы дать вам представление о процессе обработки (Стронг и Плитник, 1992, стр. 440).

Простой выбор окуляра с более высоким увеличением сам по себе является формой передискретизации (см. рис. 3-3). Здесь вы отказываетесь от внешних частей

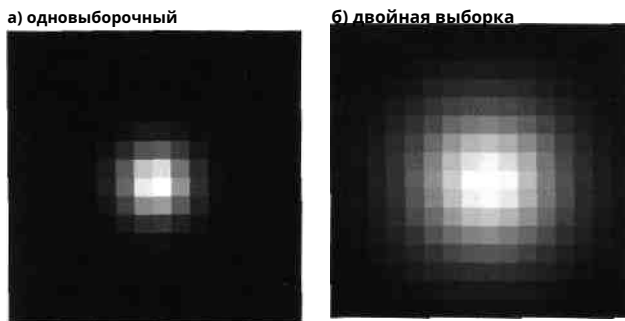


Рис. 3-3. Использование большего увеличения является формой передискретизации. Здесь объективдел вышемощность распространяется на четыре раза большую площадь сетчатки, что позволяет большему количеству рецепторов участвовать в усреднении изображения.

область изображения в пользу распространения сигнала на большее количество рецепторов сетчатки. Можно выделить области изображения, которые имеют довольно постоянную силу сигнала и окраску, но если они меньше, чем рецептор сетчатки, эта интенсивность будет смешана с соседней областью.

Сетчатка, как и любой другой датчик освещенности, шумит. Один из механизмов, который зрительная система использует для подавления шума, — это групповое рассмотрение рецепторов. Деталь, видимая только на одном рецепторе, может быть интерпретирована как шум и проигнорирована, если только она не очень яркая или контрастная. Переход к более сильному увеличению позволяет вам расширять небольшие области, пока они не покроют больше отдельных рецепторов. Среднее значение для многих шумных детекторов представляет собой менее шумное число, поэтому можно увидеть детали с более низкой контрастностью. Эта процедура работает с деталями с низкой контрастностью, даже когда увеличение расширяет размытие телескопа за пределы наилучшего разрешения глаза, что делает ее настоящей формой передискретизации. Максимальное разрешение глаза составляет около 1 угловой минуты, но изображение продолжает улучшаться до тех пор, пока увеличение не приведет к тому, что радиус диска Эйри превысит 4–8 угловых минут.

3.2.4 Рассеянный свет/звуковой шум

Любая звуковая система страдает от шума. В некоторых случаях этот шум может быть неприятным (как в старых царапанных граммофонных дисках), а в других случаях шум может быть незаметным (как в современных цифровых системах). Абсолютный уровень шума менее важен, чем его *отношение сигнал шум*, или SNR. Когда музыка тихая, постоянный низкий уровень шума может стать неприятным, поскольку теперь он звучит относительно сильно по сравнению с интересным сигналом. Однако тот же уровень шума остается незамеченным, когда музыка громкая.

Лучше оценить относительное влияние шума можно, сжимая отношение сигнал/шум логарифмически до децибелшкала,

$$\text{ОСШ} = 10 \log_{10}(I_c/I_n), \quad (3.1)$$

где I_c — мощность сигнала и I_n — это мощность шума. Для самых сильных сигналов типичного компакт-диска цифровое соотношение сигнал/шум составляет где-то выше 96 дБ. Для высококачественной аналоговой кассеты аналогичное значение может составлять около 55 дБ (Стронг и Плитник, 1992, стр. 441). Конечно, снижение качества, вызванное прохождением остальной части системы воспроизведения звука, значительно снижает эти отношения сигнал/шум. Шум начинает становиться неприятным, когда он на 20 дБ ниже интересующего сигнала, и неприятным, когда он на 10 дБ ниже того, который человек пытается воспринимать. Когда отношение сигнал/шум достигает 0 дБ или в условиях, когда шум и сигнал имеют одинаковую интенсивность, людям трудно распознавать произнесенные отдельные слова, и они улавливают только около 70% из них (Кинслери *и другие*. 1982, с. 284).

Аналогом шума в оптических системах является рассеянный свет. Скажем, поверхности вашей оптики грязные или неровные по шкале длины волны. Некоторая часть света преломляется на крошечных неровностях и рассеивается за пределами изображения объекта. Если вы пытаетесь наблюдать очень тусклый объект рядом с ярким объектом, размытие света, даже если оно составляет очень небольшую часть света яркого объекта, может быть достаточно сильным, чтобы сделать тусклый объект невидимым. «Минимальный уровень шума» вырос настолько, что это вызывает недовольство. Контрастность заметно снижается.

Мы можем рассчитать рассеяние от одного круглого куска пыли, $1/1000$ диаметра апертуры в поперечнике (для 200-мм телескопа пылинка представляла бы собой диск диаметром 0,2 мм). Одна миллионная часть энергии, падающей на апертуру, попадет на заднюю часть точки и будет поглощена или отражена. Однако мы увидим вполне обычный диск Эйри, имеющий *двухмиллионную* недостающей энергии (ван де Хюлст, 1981). Другая миллионная часть энергии разлетелась по всему полю зрения. Если предположить, что мы смотрим на большой протяженный объект и что ни один рассеянный свет не теряется за пределами интересующей области, то отношение сигнал/шум составит всего лишь $10 \log_{10}(1/000\ 000) = 60$ дБ, что все еще намного ниже уровня шума хорошей магнитной ленты. При 1000 точках мы обнаружим, что наше отношение сигнал/шум может стать заметным на уровне 30 дБ. Тридцать децибел — это примерно 7,5 звездной величины. Таким образом, если бы мы смотрели на звезду первой величины, мы бы увидели рассеянный свет в нечетком свечении с общей яркостью 8,5 звездной величины.

Рассеянный свет повреждает изображение только в особых ситуациях наблюдения. Шум, пониженный на 24 дБ, примерно такой же яркий, как второе кольцо идеальной дифракционной картины. Такой свет будет беспокоить только в том случае, если

оно закрывало что-то неясное, что редко случается при наблюдении в темном поле. Рассеяние является более серьезной проблемой при наблюдении Солнца и Луны или при восприятии очень малоконтрастных деталей на планетах.

3.2.5 Пространственные частотные/аудиочастотные характеристики

Хорошая звуковая система должна воспроизводить звук в диапазоне частот от 20 до 20 000 Гц (20 кГц). Частота 20 Гц — это грохот, который вы почти чувствуете, а не слышите; 20 000 Гц — это скрип ногтей по доске. Когда-то считалось, что за этими пределами люди слышат недостаточно хорошо, чтобы иметь смысл воспроизводить звуки в записанной музыке. Совсем недавно аудиологи обнаружили, что часть информации, необходимой для того, чтобы то, что мы слышим, казалось реальным, содержится несколько за этими пределами. Тем не менее, высококачественное воспроизведение звука обычно находится в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Тоны частотой ниже 20 Гц называются *инфразвук*, а тоны выше 20 кГц называются *УЗИ*. Аналогия с «инфракрасным» и «ультрафиолетовым» очевидна. Подумайте, что означают пределы 20–20 000 Гц. Пока частота тона находится между этими пределами, аудиоэлектроника будет воспроизводить его без особых потерь или необычного усиления. Как только частоты переходят в инфразвуковой или ультразвуковой диапазон, электроника может сильно выйти из строя, а звук ухудшается или пропадает. Другими словами, даже если более высокочастотный тон подается на переднюю часть аудиоэлектроники, на стороне динамика практически ничего не воспроизводится.

Подобный эффект можно наблюдать в телескопах, но в оптических системах наиболее интересный эффект проявляется не в области оптических частот или «цветов». Это происходит для угла.

Когда телескоп направлен на белый частокол недалеко от него, просветы можно четко рассмотреть на более темном фоне. Если вместо этого вы приклеите небольшой лист бумаги с чередующимися белыми и темными полосами на тот же забор и посмотрите на него в телескоп, у вас меньше шансов увидеть, что полосы воспроизводятся хорошо. На каком-то мелком масштабе, определяемом перемещением телескопа ближе или дальше, вы увидите, как полосы растворяются в сером пятне. Инструмент больше не воспроизводит реальность, в чем можно убедиться, подойдя ближе к объекту. Вы знаете, что телескоп смотрит на полосы, но он уже не передает их в виде отдельных полос. Здесь эффект очень близок к неспособности аудиоэлектроники воспроизводить слишком высокую частоту, только в этом случае часть объекта циклически переключалась между темнотой и светом, а затем снова темнела, поскольку рассматривались разные углы. Какая здесь аналогия с частотой? В случае звукового тона стандартными единицами измерения частоты являются циклы в секунду или герцы (названные в честь физика XIX века Генриха Герца). Что касается астрономических изображений,

единицы измерения — циклы/угловая секунда. Сходство с частотой настолько безошибочно, что величина, используемая для описания передачи деталей изображения, называется *пространственная частота*. Пространственная частота имеет единицы циклов/угла, но иногда ее выражают в циклах/расстоянии в фокальной плоскости — что-то вроде «200 пар линий/мм» или просто «линий/мм». Обычно он появляется без более точного трейлера «в фокальной плоскости».

Можно задаться вопросом, существует ли в оптических системах срез низких частот, аналогичный срезу 20 Гц в аудиосистемах. Вы можете подумать, что их не существует, потому что темные и белые полосы легче увидеть на низкой частоте. Однако эффективное ограничение обусловлено ограничениями данной области. Если в окуляре с наименьшим увеличением отображается менее одной полоски, нельзя сказать, что полоски разрешились. Другими словами, изменение освещенности, вероятно, невозможно отличить от присущего системе виньетирования. Визуальный телескоп с фокусным расстоянием $f/8$ имеет максимальную пространственную частоту 226 линий/мм в фокальной плоскости. Если эта фокальная плоскость внутри окуляра имеет ширину 25 мм, наименьшая пространственная частота определенно превышает 1 линию/50 мм или 0,02 линии/мм. Отношение этих двух чисел равно 11300. Таким образом, телескоп имеет полосу пропускания как минимум на 3 порядка типичной аудиосистемы с частотой 20–20 000 Гц.

3.3 Функция передачи модуляции (MTF)

Многие из приведенных выше сравнений аудио и видео интересны, но не имеют практического применения. Однако пространственная частотная характеристика оптики является основной проблемой, и существует очень важная причина ее использования. Этот отклик является наиболее объективной мерой качества оптической системы.

Пространственная частотная характеристика обычно записывается с использованием концепции фильтрации передаточной функции. Если объект демонстрирует синусоидальную модуляцию, постепенно меняющуюся от яркой к темной, и мы рассматриваем оптическую систему как фильтр черного ящика, то она выходит с меньшими вариациями. Возможно, сигнал выхода меняется только от светло-серого до темно-серого.

Целью пространственной частоты является не шаблон из светлых и темных полос, как в примере с частотолом выше, а плавно меняющийся шаблон, такой как показанный на рис. 3-4а. Строго говоря, такая фигура должна простираться бесконечно в обе стороны, но практическое использование ограничивает ее несколькими барами. Обычная 3- или 4-полосная диаграмма разрешения не является допустимым целевым полем в том смысле, что она бесконечна или синусоидальна, но ее настолько легко использовать, что она в любом случае обычно служит для оценки оптического качества. Еще одно требование состоит в том, чтобы освещение полосового рисунка было полностью бессвязным, и это требование обычно очень легко выполнить.

Если Созначает контраст и это пространственная частота, как мы будем

определить передаточную функцию модуляции (МТФ)

$$C_{\text{После}}(B) = \text{МТФ}(B) C_{\text{До}}(B), \quad (3.2)$$

где $\text{МТФ}(B)$ всегда меньше 1.

Давайте посмотрим на это простое уравнение и поймем, что оно означает. Если у вас есть целевой образец с определенным значением контраста, передаточная функция оптической системы всегда воздействует на этот контраст, уменьшая его. Читатели, знакомые с концепциями фильтрации, знают, что, как правило, передаточная функция может изменять фазу сигнала (что позволяет предположить, что наиболее общая передаточная функция является сложной). Здесь нас будет интересовать только его амплитуда, передаточная функция модуляции. Контраст (как до, так и после) измеряется по уровням интенсивности в самом темном месте темной полосы и в самом ярком месте светлой полосы.

$$C(B) = \frac{I_{\text{Я}} - I_{\text{Темный}}}{I_{\text{Я}} + I_{\text{Темный}}} \quad (3.3)$$

где интенсивности измерены, как на рис. 3-4. Обратите внимание: если рисунок «до» имеет нулевую интенсивность темного цвета, передаточная функция модуляции сама становится контрастом изображения (Necht 1987, стр. 507).

МТФ всеобъемлюща и мощна. Даже оптические трудности, возникающие не из-за ошибок волнового фронта, а из-за препятствий и неравномерности передачи, находят способ выразиться в передаточной функции модуляции.

Какую форму это принимает? Можно было бы подумать, что в идеальных оптических системах значение МТФ будет равно 1 для всех пространственных частот. Такой оптической системы не существует, хотя большое плоское зеркало подходит очень близко. Взглянув на рис. 3-1, изображающий «шаткую стопку» фильтров, мы можем задаться вопросом, какие фильтры активны даже в идеальных условиях. Очевидно, атмосферой можно пренебречь, предположив, что телескоп находится под идеальным небом или в космосе. Глаз и ошибки его обработки также будут игнорироваться. Предположим, что выравнивание и чистота идеальны, а виньетирование можно игнорировать. Этот процесс можно продолжать до тех пор, пока стек не станет максимально коротким.

Что осталось? Помните, даже идеальная оптическая система имеет эти два фильтра: 1) волновая природа света, используемого для создания изображения, и 2) ограниченная апертура. Этого неснижаемого минимума достаточно, чтобы заставить МТФ достичь значения меньше единицы и определить, где оно достигает нуля. МТФ идеальной круглой апертуры изображен на рис. 3-5.

Следует признать, что эта кривая мало чем напоминает плоскую кривую типичной аудиосистемы, поскольку она построена в линейном масштабе и несколько выходит за пределы полосы пространственных частот. Логарифмическая шкала децибел, используемая для музыки, имеет тенденцию сжимать спектр до широкого, плоского диапазона.

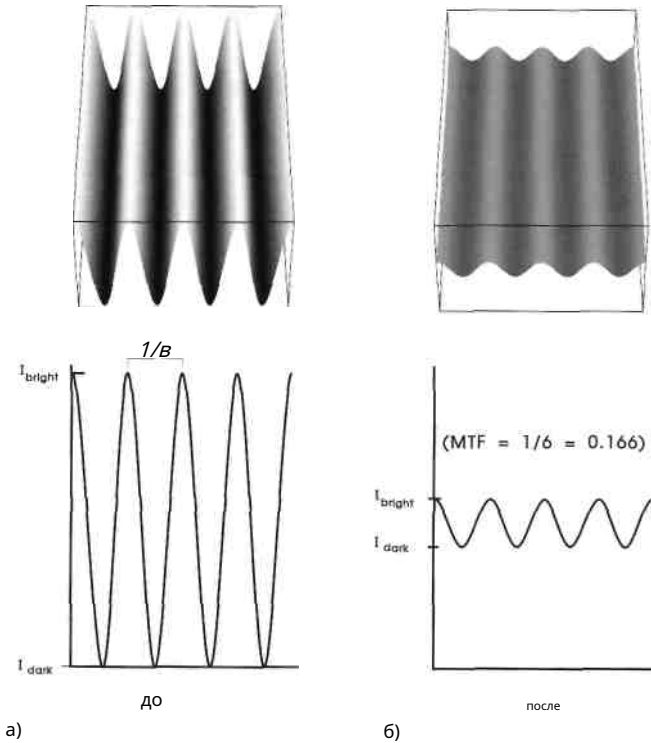


Рис. 3-4. Целевая интенсивность модулированной яркости: а) до фильтрации, б) после фильтрации. *Примечание: энергия изображения все та же, но в б) она менее модулирована. Мишень на самом деле не гофрированная—это просто способ указать яркость поверхности.*

внешний вид (0,5 = -3 дБ, 0,25 = -6 дБ и т. д.). Если бы на этом графике была аудиосистема, нижняя ось изменялась бы от 0 до значения, значительно превышающего 20 000 Гц. Фактически, легко слышимые звуки заняли бы самую нижнюю часть $1/\lambda$ спектра. Аналогичным образом, многие интересные детали небесных объектов находятся на низких пространственных частотах, где передаточная функция высока. Этот график подчеркивает самые высокие частоты, где передача, скорее всего, упадет.

$$C_{\text{Макс}} = \frac{1}{\theta_{\text{мин}}} = \frac{D}{\lambda} \quad [\text{ЦИКЛЫ/УГОЛ}] \quad (3.4)$$

Максимальная пространственная частота (крайний справа, 1,0 на графике) находится при $\theta_{\text{мин}}$ представляющий угол разделения, немного уже, чем угол $1,22\lambda/D$, связанный с радиусом дифракционного диска, также известный как критерий разрешения Рэля. Здесь отрыв стержня, равный радиусу дифракционного диска, произошел бы при $1/1,22^2 = 0,66$ от максимальной пространственной частоты (отмечено чертой).

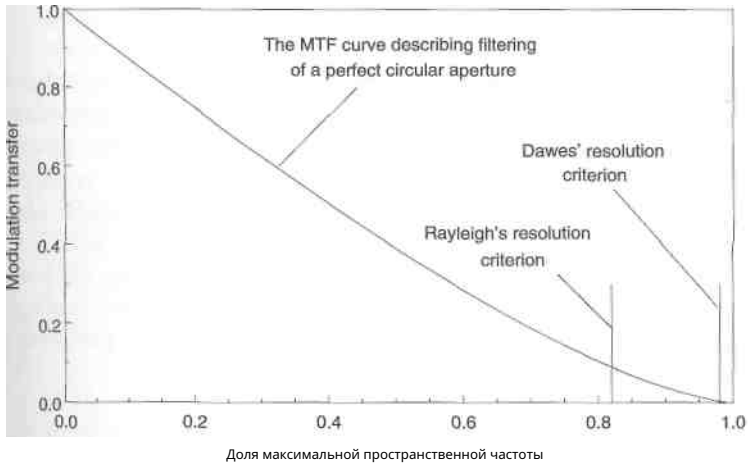


Рис. 3-5. В лучшем случае беспрепятственный круговой MTF. Некогерентное освещение предполагается целью.

Если мы хотим использовать обозначения, которые больше связаны с камерами, максимальная пространственная частота в фокальной плоскости (где Φ это фокусное соотношение)

$$C_{\text{Макс}} = \frac{1}{F\lambda} [\text{циклы/длина}]. \quad (3,5)$$

Например, если апертура имеет диаметр 200 мм и фокусное расстояние 1200 мм, а рассматриваемая длина волны составляет 550×10^{-6} мм, тогда $C'_{\text{Макс}}$ составляет 303 цикла/мм или линии/мм. $C_{\text{Макс}}$ в угловых обозначениях для апертуры 200 мм это будет 364 000 циклов на радиан или 1,76 циклов на угловую секунду.

3.4 Используемый MTF

Авторы астрономии утверждают, что апертура, закрытая примерно на 30%, примерно так же плоха, как и открытая апертура с $1/4$ длины волны сферической aberrации. Откуда они это знают? По-видимому, они сравнивают два совершенно разных явления. Изображения одинаково ухудшены?

Каждый, у кого есть опыт оценки изображений, знает, что эти авторы не могли вывести цифру в 30% на основе опыта. Различия между оптическими изображениями незначительны, и это число слишком точное. Есть много способов вычислить эту величину, например, указав количество энергии в центральном диске. Для нашей цели мы рассчитаем энергии, содержащиеся внутри дифракционного пятна свободной апертуры с $1/4$ длины волны сферической aberrации и несколько закрытых апертур, которые в остальном идеальны. Выбираем препятствие, которое наиболее точно соответствует

потери энергии сферической аберрации. Ответ: апертура закрыта примерно на 32%.¹

Однако мы должны изучить частотные характеристики этих двух ситуаций, чтобы увидеть, где нарушается общее утверждение об эквивалентности. Соответствующие MTF показаны на рис. 3-6. Мы видим, что они примерно одинаковы для пространственных частот около половины критерия Рэля. Для 200-мм телескопов эти две оптические ситуации одинаково хорошо показывают периодические детали планет с интервалами примерно от 1 до 2 угловых секунд.

Однако отклик на более высоких и низких пространственных частотах различен. На высоких частотах закрытая диафрагма обеспечивает лучший контраст, чем $\lambda/4$ длина волны сферической аберрации. Удивительно, но он даже работает лучше, чем идеальная диафрагма.

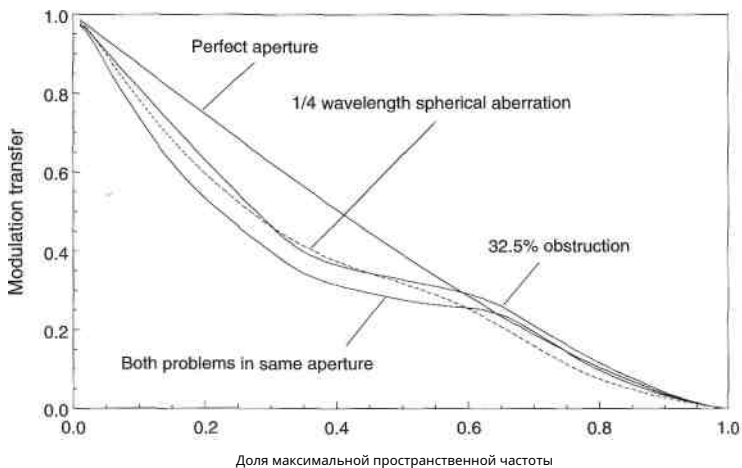


Рис. 3-6. Сравнение нитрования простой сферической аберрации и центральной обструкции.

На нижнем уровне закрытая апертура имеет более высокую MTF для пространственных частот до тех пор, пока расстояние между полосами не превысит более чем в восемь раз критерий Рэля. При апертуре 200 мм детали, разделенные расстоянием от 2 до 5 угловых секунд, лучше видны при закрытой апертуре. На грубых деталях, разделенных более чем 5 угловыми секундами, два контраста практически одинаковы, но все же немного меньше, чем при идеальной диафрагме.

Таким образом, для просмотра дальнего неба с низким энергопотреблением, $\lambda/4$ длина волны сферической аберрации немного хуже, чем у препятствия. При разделении двойной звезды, соответствующем критерию Рэля или немного превышающем его, препятствие снова побеждает. Только

¹См. Таблицу 10-1.

для промежуточных пространственных частот частотная характеристика примерно такая же или худшая в загражденном инструменте.

Препятствие можно регулировать до тех пор, пока передаточные функции не станут немного ближе (диаметр тени составит почти 35% от полной апертуры), но не следует проводить комплексные сравнения без осторожности.

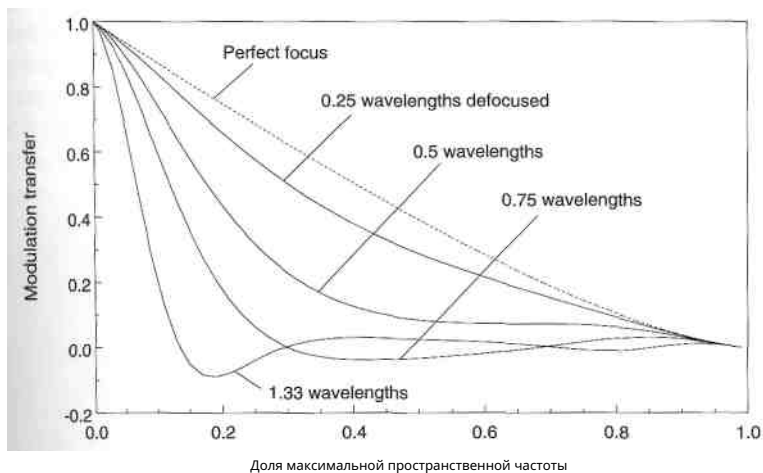


Рис. 3-7. MTF, связанные с различной степенью расфокусировки.

3.4.1 MTF, связанный с расфокусировкой

Самый простой способ ухудшить изображение — расфокусировать его. На рис. 3-7 показано, как падает MTF при увеличении расфокусировки. В $1/4$ расфокусировка по длине волны, производительность начинает заметно страдать; $3/4$ длины волны это неприемлемо.

Эти передаточные функции обладают чрезвычайно интересным свойством. При более высоких значениях дефокусировки передаточная функция становится отрицательной для некоторых пространственных частот. Если проследить это поведение с помощью приведенных выше уравнений контраста, можно увидеть, что оно приводит к переключению интенсивностей яркого и темного изображения. Синусоидальные мишени сами по себе выглядят как негативы.²

Означает ли это, что при определенных положениях фокуса звезда будет выглядеть темной, а ночное небо — светлым? Конечно, нет. Изображение истинно точечной звезды состоит из всех пространственных частот. Контраст передается с правильным знаком на множестве других пространственных частот. Этот странный эффект

² MTF не может быть отрицательным по самому строгому определению, но здесь допускается нести знак полной оптической передаточной функции, когда фаза близка к 0 или π . Более подробную информацию см. в Приложении Б.

не влияет таким образом на обычные изображения — обычно это лишь способствует общему размытию. Однако если две или три полосы облаков на Юпитере разделены правильно, слегка расфокусированный телескоп может привести к появлению ложной полосы между ними.

Тот факт, что это редкость, не означает, что нельзя принять меры, позволяющие наблюдать этот эффект. На рис. 3-8 хорошо видно изменение контраста. Этот снимок был сделан сильно расфокусированным объективом камеры, направленным на радиальную мишень. Эти столбцы не синусоидальные, а периодические. Когда узор проходит через совершенно неразрешенную серую зону, он появляется на другой стороне с противоположной интенсивностью. Только вблизи края он не действует таким образом (Goodman 1968, стр. 126).

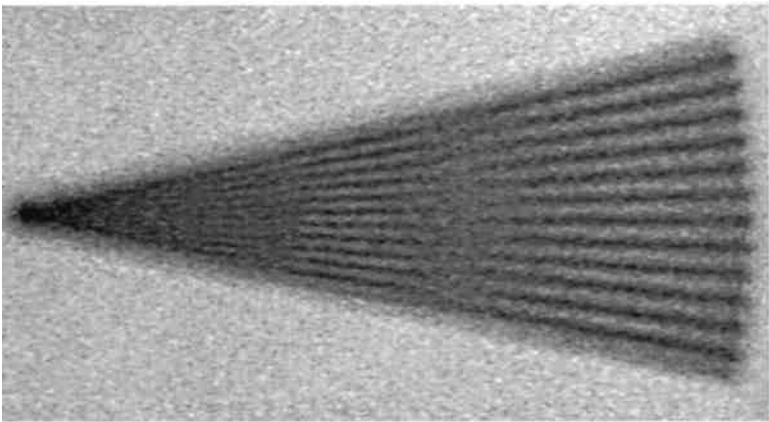


Рис. 3-8. Расфокусированная радиальная мишень. Посмотрите с узкого конца на скользящее падение на бумагу. Некоторые из полос меняют темный цвет на светлый.

3.4.2 Объединение MTF

Пока оптические трудности не зависят друг от друга, общий MTF системы представляет собой просто отдельные MTF, умноженные вместе согласно следующему рецепту:

$$MOG_{\text{общий}}^n = MOG_{\text{идеальный}} \left(\frac{MOG_1}{MOG_{\text{идеальный}}} \right) \left(\frac{MOG_2}{MOG_{\text{идеальный}}} \right) \dots \left(\frac{MOG_n}{MOG_{\text{идеальный}}} \right) \quad (3,6)$$

Каждая величина в скобках называется фактор деградации оптической ошибки, обозначаемой 1, 2 и т. д. Числителем каждого коэффициента ухудшения является MTF, который был бы измерен, если бы апертура страдала только от этой оптической проблемы.

Конечно, никакие две оптические трудности не являются по-настоящему независимыми, даже если на первый взгляд они кажутся не связанными друг с другом. Из рис. 3-6 мы можем сделать вывод, что сферическая aberrация на поверхности не имеет ничего общего с подвешенным над ней вторичным элементом. Но вторичная часть отбрасывает тень на зеркало и тем самым меняет вклад aberrации в волновой фронт. Средние пространственные частоты кривой «Оба» на рис. 3-6 не так плохи, как ожидалось из этого уравнения ухудшения.

Особенно удачным результатом отсутствия независимости является эффект зонального дефекта в центре зеркала. Если диагональ достаточно большая, это полностью затенит ошибку и вы не сможете обнаружить aberrацию.

Некоторые оптические устройства, особенно без сменных окуляров, имеют оптику, выполненную как единое целое. Aberrации, присущие объективу, компенсируются противоположно направленными aberrациями в окуляре или другой оптике хвостовой части. Когда они разделены, они работают плохо или вообще не работают (обычно в избыточной военной технике). Пытаясь использовать уравнение деградации для такой оптики, оценщик должен быть осторожным, чтобы описать всю систему, а не только ее часть.

Для большинства астрономических телескопов неизвестная природа того, что будет прикреплено сзади (будь то камера или окуляр), требует, чтобы только объектив обеспечивал хорошее изображение. Неписанный протокол проектирования астрономических телескопов требует, чтобы разработчик реализовал максимальное количество желаемых характеристик в фокусе как окуляра, так и объектива.

Существуют методы измерения кривой MTF для набора оптики, но в последующих главах они не будут акцентироваться на них, поскольку они требуют большого количества дополнительного оборудования (Baker 1992, Murata 1965). Эта книга концентрируется на теоретическом описании идеальных случаев. Обратите пристальное внимание на кривые MTF на следующих страницах. Хотя эти кривые могут показаться неинтересными и похожими друг на друга, они охватывают все оптические задачи. Если вы научитесь их интерпретировать, вы лучше поймете, как ухудшилась ваша оптика.

Глава 4

Дифракция

Для людей, впервые изучающих дифракцию, различные точки зрения, представленные в этой главе, могут быть ошеломляющими, а основные выводы могут быть потеряны в деталях. Однако несколько элементов имеют решающее значение для этого обсуждения, поэтому давайте рассмотрим их вначале:

1. Дифракция обусловлена волновой природой света. Поскольку свет невозможно локализовать, изображения обязательно будут нечеткими. Квантовомеханическая концепция фотона как частицы не помогает зафиксировать его положение.
2. Дифракция — следствие ограниченной апертуры. Это *угловой* размытие, не зависящее от фокусирующей силы инструмента.
3. Дифракция – это не просто явление, наблюдаемое в кольцах. Расплывание центрального пятна вызвано дифракцией.
4. Квазистатистические светлые и темные области существуют потому, что дифракцию можно смоделировать как стоячую волну, границы которой определяются апертурой.
5. Существует предел оптического качества, который трудно превзойти.

Как только читатели получают практические знания о дифракции, звездный тест будет легче понять. Сама дифракция не всегда хорошо объясняется, и многие люди верят в своего рода фольклор о том, что это такое и что ее вызывает. Авторы либо полностью избегают дифракции, либо прибегают к слишком легкому прибежищу математики. Недостаток вводных инструкций вызывает сожаление, поскольку концепции, лежащие в основе дифракции, не так уж и сложны для понимания. Что еще более важно, некоторые из этих идей являются самыми красивыми и фундаментальными в физике. Дифракция затрагивает такие разнообразные понятия, как пределы познаваемого и концепция частицы.

Дифракция — это нечто большее, чем просто процесс образования колец вокруг изображения звезды. Хотя это правда, что дифракция создает эти кольца, можно затенить края апертуры, чтобы сделать такие кольца сколь угодно маленькими. Однако дифракция по-прежнему размывает центральное пятно. Изображения без колец по-прежнему демонстрируют дифракцию. Буквально дифракция означает «разрыв» волнового фронта, который нарушается при прохождении волны вблизи затеняющего тела.

Допустим, мы находимся во Вселенной, где свет состоит из бесконечно мельчайших частиц, которые можно проследить от звезды, через телескоп и, наконец, до глаза. В таком мире дифракция не существовала бы. Либо частицы продолжают спокойно выходить за пределы затемняющего тела, либо они сталкиваются и останавливаются. Близкий подход не имел бы никакого значения. Область за пределами освещенного конуса вблизи фокуса, где обычно не ожидается света, называется *геометрическая тень*.

Когда проектировщики оптики используют трассировку лучей, они используют предположение «легких частиц», согласно которому свет будет проходить только там, где позволяет геометрия. Концепция света, движущегося в частицах, называется «лучевой оптикой». При трассировке лучей в системе они предполагают, что свет будет проходить через оптику, как будто это крошечная упругая сфера, ударяясь об оптические поверхности и отклоняясь в соответствии с эмпирическими правилами преломления и отражения. Удивительно, но эта баллистическая модель достаточно хорошо предсказывает ход света. При первом заказе он отлично справляется со своей задачей.

К сожалению, поведение света имеет и другие характеристики, не объясненные моделированием света как частицы. Свет, кажется, способен поворачивать за угол. Сама по себе эта особенность не слишком удивительна. Любой предприимчивый физик 17 века мог, например, постулировать, что частица света имеет некоторый конечный размер. Когда он касается поверхности, его можно отодвинуть обратно в освещенную область. Но эксперименты, проведенные вблизи прямых краев, показали, что свет отклоняется в тени затемнения. Вместо того, чтобы удариться плечами о заслоняющее тело и вылететь в освещенную область, луч света как будто ухватился за край проема и закружился. Как ни странно, часть тени, казалось, также просачивалась в освещенную область.

Некоторые углы отклонения являются предпочтительными. При удалении от положения наилучшего фокуса подсветка тускнеет, как и ожидалось. Но вот что странно: потом оно снова начинает светлеть. При все больших и больших углах освещение испытывает множество таких колебаний, которые вызывают появление знакомых дифракционных колец вокруг звезд. Теория, постулирующая свет как частицу, не может понять такое поведение, кроме как предположив дефект в оптике. При фокусировке никто не ожидает, что свет будет где-либо, кроме ослепительной точки в центре.

Окончательное объяснение пришло к выводу, что свет похож не столько на частицы, сколько на волны. Многие из этих эффектов можно наблюдать в

лужу или другой мелкий водоем, наблюдая за поведением водных волн на поверхности. Положите кусок дерева на часть лужи так, чтобы он мешал равномерному течению волн, и создайте волну, бросив камешек на одну сторону бассейна. Обратите внимание: когда волна проходит через конец дерева, она закручивается в защищенную область. Это дифракция.

Волны на воде очень интересны, но, похоже, они не сразу связаны с оптическим качеством телескопа. Однако мы увидим, как поведение волны вблизи препятствия или края приводит к ухудшению изображения. Дифракция — это механизм, который приводит к неизбежным дефектам телескопов.

В старой модели света как частицы изображение могло быть идеальным, пока поверхности были идеальными. Крошечные частицы полетели бы в телескоп, минуя все препятствия. Тогда они будут идеально отклоняться оптикой и всегда отображаться в нужной точке. Лучи в идеальном инструменте либо полностью не попадают в телескоп, либо попадают в бесконечно малый круг размытия. Мы смогли внимательно рассмотреть изображение исключительных инструментов и действительно увидеть крошечную копию звезды. Рядом мы также можем наблюдать еще меньшее изображение планеты.

К сожалению, реальный мир оптики не допускает бесконечной точности. Волны не локализованы. Это очень похоже на рисование пальцами, но в варежках нарисовать тонкие линии или точки такими пухлыми пальцами невозможно. Люди часто думали, что дифракцию можно подавить, затенив или рассеяв края. Однако дифракция возникает потому, что энергия волны существует в конечной, ограниченной апертуре. Апертура всегда находится в нашей оптической системе, поэтому изменение края формирует ход разрушения волн, а не факт, что они будут нарушены. Мы можем распространять эффекты дифракции, как ребенок перекладывает овощи на тарелке, но мы не можем заставить их исчезнуть.

4.1. Координаты света

Где световая волна? На рис. 4-1 попытайтесь указать местонахождение световой волны. Можно было бы предположить, что световая волна — это один из длинных гребней, изображенных на рисунке, но эта гипотеза ошибочно принимает графическое изображение за истину. При изображении распространения света удобно отмечать гребни или впадины, но эти места не имеют особого значения. Точки на полпути вверх по волне являются не меньшей частью волны. Указывая на волну, мы должны быть осторожны, чтобы не позволить человеческой интерпретации исказить ответ.

Как мы могли предпочесть один герб другому? Мы могли бы отметить гребень волны, соответствующий объекту, представляющему телескопический интерес, например, тому, что только что появился.

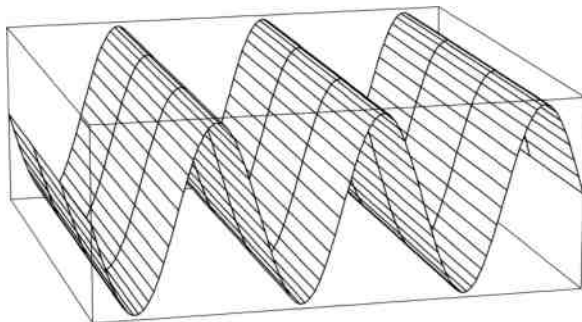


Рис. 4.1. Часть волны.

проходя через отверстие. Однако такое назначение не имеет никакого смысла. Свет не заботится о том, что для него запланировано; у него нет памяти или мотивации.

Ответ на исходный вопрос прост, но неудовлетворителен. Волна не находится в каком-то конкретном месте. Фактически, лучший способ описать волну — это признать ее динамическим процессом.

Важно помнить, что у волны есть источники (лампы, лазеры, звезды и т. д.), модифицированные границами. Источники — это точки, которые можно заключить в объемы, которые, по наблюдениям, излучают больше энергии, чем получают. Границы состоят из дифрагирующих затемнений, краев апертуры, отражающих поверхностей и поверхностей перехода между преломляющими средами. Необходимо указать поведение волны на этих поверхностях (поглощается ли она, отражается или передается с меньшей скоростью). Чтобы правильно описать дифракцию, мы должны решить то, что называется *краевая задача* для волнового уравнения в интересующей области.

Откуда приходит волна, насколько она сильна и куда она движется, важнее, чем то, где она находится. Наша волна подобна хореографическому сценарию: в каждой крошечной точке пространства есть свои танцевальные инструкции. Волна, которую мы воспринимаем, представляет собой совокупность всех этих танцоров, движущихся согласованно.

Сам факт, что мы не можем указать на частицу света и сказать: «Она здесь», вносит некоторую неопределенность в способность света направляться. Эта мягкость расположения света приводит к размытию конечного изображения.

Квантовая революция показала, что свет упакован в дискретные частицы, называемые фотонами. Поскольку квантовая теория является усовершенствованием более ранних методов, не означает ли это, что свет все-таки состоит из маленьких лучей?

Квантовая теория странна и неинтуитивна. Чтобы понять это, мы должны быть готовы отказаться от нашего опыта макроскопического мира. Мы слишком велики, чтобы использовать то, что мы знаем о мире, в попытке визуализировать квантовую вселенную.

В квантовой механике способ описания положения фотона до того, как он был обнаружен, заключается в указании его плотности вероятности, т. е. вероятности встречи фотона в определенном месте. Плотность вероятности частицы связана с ее волновой функцией. Там, где волновая функция сильна, плотность вероятности высока. Но плотность можно измерить, только пропустив множество фотонов через оптику.

Возможно, лучший способ объяснить этот принцип — представить себе следующий эксперимент. Предположим, у нас была апертура, показанная на рис. 4-2а, и одиночный фотон падал слева. В центре внимания фотопленка. Фотон попадает в эмульсию в точке А, вызывая реакцию в одном зерне светочувствительного материала. Если бы мы остановились на этом и проявили фильм, у нас уже были бы противоречивые доказательства. С одной стороны, затемненное зерно не находится точно в том месте, где находится геометрический фокус, а именно там, где пунктирная линия пересекает пленку. Но эмульсия была затронута только в этой одной точке, и у нас сложилось впечатление, что частица была обнаружена. «Возможно, выравнивание нарушено», — можем сказать мы и осторожно провести эксперимент еще раз. Теперь он попадает в Б.

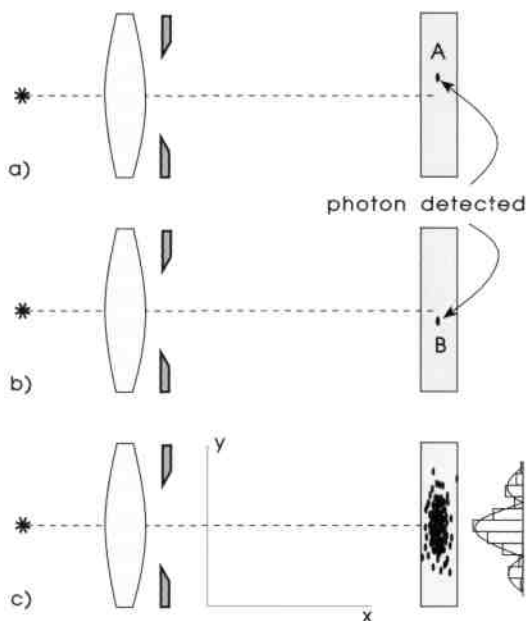


Рис. 4-2. а) Одно попадание в точку А; б) еще одно попадание в точку Б; в) много совпадений с гистограммой.

В этот момент разумные фотографы поймут, что у них закончится пленка, прежде чем они приблизятся к истине. Для следующего испытания мы

оставлять фильм длится достаточно долго, чтобы собрать множество попаданий фотонов. Разделим территорию на миниатюрные области, называемые *элементами изображения*, или *пиксели*, затем подсчитайте все попадания в каждом пикселе и отобразите их справа, как показано на рис. 4-2с. Теперь мы видим тенденцию — начинает проявляться дифракционная картина. Но мы уже знаем, что такое поведение объясняется волной.

Итак, мы возвращаемся к исходному вопросу: свет лучше всего описывается частицами или волнами? С одной стороны, ясно видно, что что-то влияет на фотоэмульсию в отдельных местах. Вы можете уменьшать интенсивность света до тех пор, пока скорость потемнения зерна не станет сколь угодно низкой. Кажется, это указывает на крошечные частицы. С другой стороны, множество таких отдельных частиц статистически распределены по закономерностям, ожидаемым для волны.

Мы приняли за символ веры, что у света нет разума или мотивов. Здесь мы, похоже, обнаруживаем, что фотоны, по-видимому, могут запоминать места, где уже были обнаружены другие фотоны. Ведение учета и связь — еще две силы, которые трудно приписать легким частицам.

Мы столкнулись с так называемым "*корпускулярно-волновым дуализмом*", один из кажущихся парадоксов квантовой физики. Сама идея частиц (будь то фотоны, электроны, кварки или что-то еще), носящихся вокруг, является примером одной из тех конкретных идей реального мира, которые не применимы на квантовом уровне. Мы не можем навязать свою макроскопическую реальность микроскопической ситуации. Нам бы хотелось, чтобы частицы имели аккуратную сферическую форму, были окрашены в разные оттенки и имели яркую прямоугольную подсветку, отражающуюся от окна в верхней левой части. Но квантовый мир не представляет нам таких утешительных картин. Важно помнить, что мы не можем определить, является ли фотон частицей или волной. *в то же время*.

Единственный способ определить существование фотона — это прикрепить его к фотодетектору. Мы можем думать об этом как о волне, пока не пытаемся определить ее местонахождение. Когда мы это делаем, его плотность вероятности сжимается из бесконечного числа мест, определяемых волновой функцией, в одну точку. Мы можем посмотреть на крошечные зерна фотографии и сказать: «*Это был там*», пока мы понимаем, что глагол стоит в прошедшем времени. Единственный способ убедиться в существовании фотона — уничтожить его.

Первым физиком, который изложил это в математической форме, был Вернер Гейзенберг, который сформулировал так называемый принцип неопределенности — или, лучше сказать, «неопределенности». Этот принцип вовсе не является разочарывающим пределом того, что мы можем знать, он говорит нам новые вещи о динамике движения частиц. Можно даже использовать принцип неопределенности, чтобы получить приближенное выражение для радиуса дифракционного диска.

Что неизвестно в этой ситуации, так это то, где фотон (то есть «луч») вошел в апертуру. Мы знаем, где это закончилось и где началось, но мы не уверены в промежуточном пути. Гейзенберг

Принцип неопределенности формулируется примерно следующим образом: неопределенность импульса частицы в определенном направлении, умноженная на неопределенность ее положения, примерно равна очень маленькой константе, или

$$\Delta p_{\parallel} \Delta y \approx \text{час} \quad (4.1)$$

где Δp_{\parallel} это нечеткость импульса в направлении, Δy это нечеткость в положении, а час это небольшое число, называемое постоянной Планка. Мы можем переписать это приближение, чтобы найти разброс угла обнаружения после многих отсчетов:

$$\frac{\Delta p_{\parallel}}{p_{\parallel}} \approx \frac{\text{час}}{p_{\parallel} \Delta y} \approx \theta_{\text{дифракция}} \quad (4.2)$$

Выражением импульса фотона является энергия, деленная на скорость света, или E/c . Энергия фотона равна $E = h\nu$. Константа c – это скорость света, ν – частота света, λ – длина волны; $c = \nu\lambda$ описывает взаимосвязь этих величин. Неопределенность положения Δy это просто диаметр апертуры D . Таким образом, неопределенность угла становится

$$\theta_{\text{дифракция}} \approx \frac{hc}{VhD} \approx \frac{\lambda}{D} \quad (4.3)$$

Этот результат близок к $1,22\lambda/D$ выражение для углового радиуса диска Эйри.¹

4.2 Последствия фильтрации

В главе 3 мы уже видели, что телескоп имеет ограниченную пространственно-частотную характеристику, аналогичную частотной характеристике аудиоаппаратуры 20–20 000 Гц. В чем смысл такой фильтрации? Можно ли использовать знания об ограничении пространственных частот для получения интересных фактов о дифракции?

Двумерная круглая поверхность апертуры вносит в задачу некоторые неинструктивные математические сложности, поэтому будет легче снова обратиться к более простой ситуации с аудиоэлектроникой. В этом случае нас интересуют только изменения во времени или частоте.

Аудиоаналог звезды или точечного оптического источника – электронная попса. Это также может быть вызвано царапиной или дефектом старого винилового LP-диска. Если вы когда-нибудь пытались слушать далекую радиостанцию во время грозы, вы, вероятно, знакомы с треском, возникающим при ударе молнии. Однако вы, вероятно, не заметили одну вещь: каждый из этих щелчков звучит одинаково, различаясь только по амплитуде.

¹Уравнение 4.1 упрощено. Те, кто интересуется этой темой, могут найти дополнительную информацию в любом учебнике по элементарной квантовой механике, например, Park 1974.

Этот факт кажется достаточно невинным, но он дает нам представление о воспроизведении звука. Каждое потрескивание звучит одинаково в одной аудиосистеме. Если вы слушали другую аудиосистему, имеющую совершенно другую конфигурацию — скажем, дешевый ручной транзисторный радиоприемник по сравнению с вашей стереосистемой — она может иметь другую тональность. Тем не менее, каждая поп-музыка, созданная этим другим радио, такая же.

Правильная интерпретация этого однородного поведения состоит в том, что вы не прислушиваетесь к деталям электрической активности шторма или его источника. Вы слышите какую-то подпись самого устройства воспроизведения. Треск — всего лишь лучшая попытка воспроизвести резкий прыжок.

В начале XIX века физик Жозеф Фурье обнаружил, что сложные, даже прерывистые функции можно моделировать со сколь угодно высокой точностью суммой ряда синусоидальных и косинусоидальных функций все более и более высокой частоты. «Поп» можно описать этой бесконечной серией:

$$v(t) = 1 + 2(\cos(t) + \cos(2t) + \cos(3t) + \dots), \quad (4.4)$$

где $v(t)$ — амплитуда как функция времени. Резкий треск, который мы на самом деле слышим, — это интенсивность $a_z(t)$.

Будучи фильтром, аудиосистема не переводит частоты в произвольно высокое значение; он начинает выходить из строя примерно на 20 000 Гц. Таким образом, нам придется где-то урезать этот ряд. На рис. 4-3 показано влияние на интенсивность, если мы обрежем ряд на 10 косинусных членов. Резкий всплеск треска был сведен к совершенно другой функции.

Эта функция отклика напоминает дифракционную картину с кольцами. По сути, она идентична дифракционной картине щелевой или прямоугольной апертуры. Дифракция является результатом неспособности оптической системы передавать сколь угодно высокие пространственные частоты, точно так же, как звон на рис. 4-3 является следствием ограниченной полосы пропускания звука. Точечная звезда действует как резкий звуковой импульс. Картина дифракции звезды аналогична функции импульсного отклика. Это называется *функция распределения точек* потому что большинство звезд находятся далеко и занимают незаметно малые углы. На рис. 4-3 появляются не только кольца, но и бесконечно острый пик расширился до узкого пика измеримой ширины.

Внимательные читатели, вероятно, понимают, что симметрия паттерна означает, что кривая отклика колеблется задолго до того, как на пластинке действительно произойдет хлопок, но такое колебание невозможно. Название этого ограничения *причинность*, или требование, чтобы причина предшествовала следствию. Причинность — центральный вопрос специальной теории относительности, но она имеет значение и здесь. Симметрия рис. 4-3 является результатом простодушного способа моделирования этого процесса. Фазовые сдвиги отдельных косинусоидальных членов в приведенном выше уравнении игнорировались. Мы неявно предполагали, что

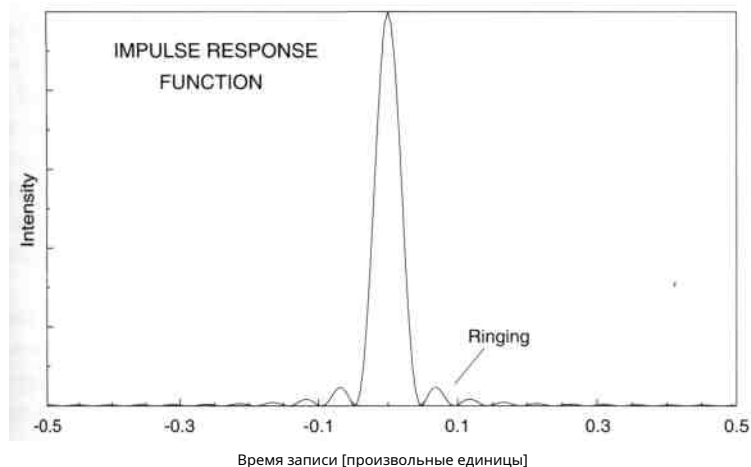


Рис. 4-3. Интенсивность звукового треска моделируется как усечение ряда в уравнении. 4.4.

все сигналы проходят через систему с одинаковой скоростью и одной фазой. Реальная система немного задерживает каждую частоту и подстраивает фазы таким образом, чтобы ни один сигнал не мог быть обнаружен до того, как он произойдет. Рисунок станет асимметричным, и большая часть звона будет возникать после самого резкого пика. Каждая аудиосистема имеет свое характерное невнятное звучание этого рисунка.

К счастью, картины оптической дифракции не рассчитываются на основе частот, зависящих от времени, и не обязаны подчиняться причинно-следственной связи. Они могут быть красиво симметричными. В конце концов, пространственная частота — это всего лишь удобная аналогия истинной частоты. Вы можете смотреть на любую сторону оптического рисунка, но не можете вернуться в прошлое.

4.3 Волны возрождаются

Следующий и самый важный способ взглянуть на дифракцию — это очень старая теория, первоначально предложенная Христианом Гюйгенсом (1629–1695) для объяснения того, почему свет наблюдается в области тени.

Термин *распространение волн* используется без особого внимания к его происхождению. «Размножение» — это слово, первоначально связанное с ботаникой, где оно означало создание новых растений из черенков. Его значения включают размножение, воспроизводство или распространение растений и животных. Оно стало означать распространение идей или даже дезинформации (отсюда и «пропаганда»). Но концепция воспроизводства присуща размножению и дает ключ к пониманию того, что предложил Гюйгенс.

Гюйгенс мог объяснить появление света в тенях, предположив, что каждая точка волнового фронта излучает свой собственный сферически расходящийся вейвлет. Следующий момент волны будет определяться суммой всех этих крошечных вейвлетов. Только в направлении движения волнового фронта вейвлеты не будут компенсировать друг друга. В других направлениях вейвлет, движущийся вбок, нейтрализует вейвлет другой точки, который находится в противофазе с ним. Точно так же, если живая изгородь попытается вырасти вбок, она обнаружит, что лист на другой ветке уже забрал солнечный свет. Единственное направление, в котором рост свободен, — это вверх и вовне.

Мгновение спустя каждая новая точка волнового фронта излучала бы еще один сферически расходящийся вейвлет. Аналогично и в живой изгороди внутренние листья увядают и заменяются внешними. Таким образом, мы могли бы описать волновую прогрессию как возрождение на каждом новом волновом фронте, «распространение» в старом ботаническом смысле.

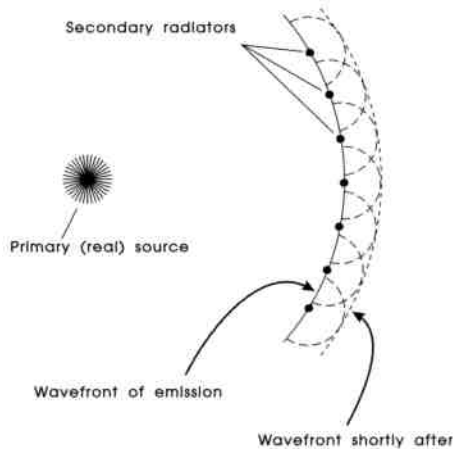


Рис. 4-4. Свободная расходимость сферической волны.

Ситуация на рис. 4-4 не требует рассмотрения распространения, но на рис. 4-5 мы видим причину этого. Когда волна, распространяющаяся от удаленного источника, сталкивается с апертурой, в прекрасной симметрии происходит внезапное нарушение. Точки внутри апертуры излучают вейвлеты вверх, вниз или наружу, но никакие соответствующие источники в тени апертуры не обеспечивают подавления помех с этого направления. В центре апертуры волна распространяется так же, как и в свободном поле, но по краям некоторая часть энергии утекает в геометрическую тень. Маленькие точки, излучающие вейвлеты, называются *элементарные радиаторы* или *вторичные источники*. Эти радиаторы не представляются действительно висящими, как бусины, в апертуре. Это всего лишь бесконечное количество математических точек.

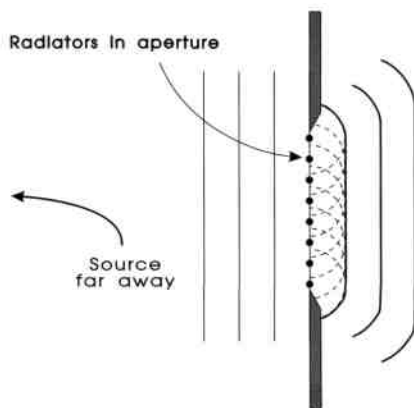


Рис. 4-5. Дифракция плоской волны на отверстии.

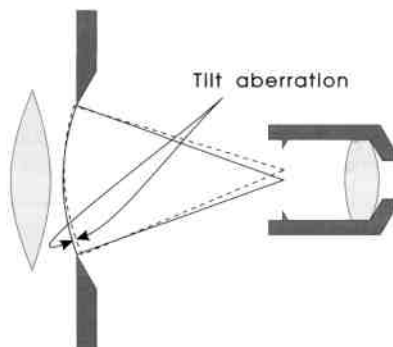


Рис. 4-6. Объектив, диафрагма и окуляр с aberrацией наклона.

4.3.1. Дифракция и фокусировка.

Дифракция в астрономических телескопах вызвана ограничением света входной апертурой. Фокусировка – это удобство, налагаемое на оптическую систему. Это подразумевается на рис. 4-6, где апертура и сила фокусировки разделены на две независимые функции. Одна из функций — рассеивание света диафрагмой или прямоугольной крышкой — дифракционной апертурой. Дифракция возникает независимо от того, сфокусирован свет или нет; такое случается даже в камерах-обскурах.

Вся оптическая работа совершается на недифракционных фокусирующих частях оптической системы. Таким образом, задача оптика – не сделать существующую проблему

хуже, если добавить дополнительные аберрации к линзе или зеркалу. Оптик не может исправить окно, через которое смотрит телескоп.

В дальнейшем обсуждении предполагается, что фокусировка уже завершена, когда волновой фронт достигает апертуры. Эта конвенция не меняет общих принципов.

4.3.2 Зоны Френеля

В фокусе все излучатели должны колебаться с одинаковой фазой. Кажется, что каждая точка идеальной апертуры вращается вместе с любой другой точкой. Датчик в таком фокусе залит светом. Однако под небольшим углом к оптической оси (как на рис. 4-6) датчик видит некоторые точки, колеблющиеся немного позади других точек. На самом деле они не делают ничего особенного, но часть апертуры находится дальше. Поскольку по мере того, как свет проходит дополнительное расстояние, проходит время, эти излучатели в точке смещения воспринимаются как отстающие от остальных. Частичное подавление волн приводит к тому, что общая интенсивность света становится меньше на этом боковом расстоянии от фокуса.

Если датчик отклоняется достаточно далеко от оси, некоторые удаленные части апертуры снова оказываются синфазными. На самом деле они находятся на расстоянии полной длины волны позади ближних частей апертуры, но поскольку колебания синусоидальные, мы не можем заметить разницу. Источниками этих волн являются атомные переходы, которые происходят быстро, но вспышка света может представлять собой одиночный волновой пакет длиной во многие метры и миллионы длин волн. В течение нескольких длин волн мы действительно не видим никакой разницы от одного гребня волны к другому.

Различные задержки обозначены на рис. 4-7 как *зоны Френеля*, темные и светлые области на диафрагме. Ноль фазы возникает только на границе двух зон. Элементарные излучатели, опережающие по фазе, обозначаются как «+» области. Точки, отстающие по фазе, называются регионами «—». Темный или светлый цвет — это лишь идентификатор каждого региона; это означает изменение фазы на половину длины волны. Оно не представляет ни реального внешнего вида, ни освещения. В действительности эти регионы постепенно переходят друг в друга. Реальная фаза меняется плавно, но эти области дергаются от одного знака к другому.

Положение обнаружения на рис. 4-7 обозначено крошечной точкой, которая находится в фокальной плоскости окуляра. Более того, рисунок на апертуре указывает на зоны Френеля, видимые из этой точки, а не с нашей внешней точки зрения.

Эта картина быстро меняется. Всего за $9,2 \times 10^{-16}$ секунды картина меняется с положительной на отрицательную (помните, волны летят в

:Назван в честь физика Огюстена Дж. Френеля (1788–1827 гг.).

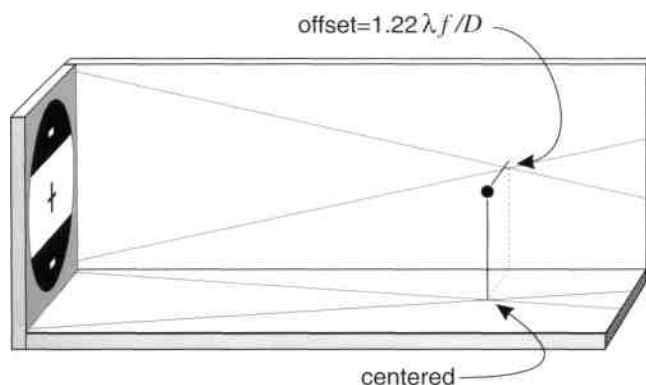


Рис. 4-7. Зоны Френеля, если смотреть со стороны точки, смещенной от звезды. Обратите внимание на проекции светового конуса на нижнюю и дальней стенке телескопа. Это смещение составляет $1,22\lambda f/D$ над сфокусированным изображением. Положительная и отрицательная области компенсируются, так что это смещение становится первым темным кольцом.

диафрагма). Если мы проследим за движением баров постепенно в небольших временных масштабах, они устремятся вниз. Если детектор находится в нижней части фокуса, они устремляются вверх. Фактическая принимаемая волна в любом данном месте представляет собой среднее по времени суммарное значение фазы всех этих крошечных излучателей.

Описание фаз зоны Френеля на апертуре не следует путать с внешним видом изображения. Каждое место на изображении имеет свой набор зон Френеля. Паттерны зон Френеля невозможно наблюдать напрямую, поскольку они относятся к волновому полю, и мы можем измерять только интенсивность на датчике. Эта картина зоны Френеля — удобная модель, не более того. Тем не менее, с его помощью удастся продемонстрировать многие явления дифракции, и он лежит в основе более точных расчетов, описанных в Приложении Б.

Рискуя показаться слишком простодушными, давайте представим это отверстие как большой диск плотной бумаги. Чтобы определить суммарную интенсивность волны, мы вырезаем все участки диска одинакового цвета и бросаем их в две отдельные кучки: одну положительную, другую отрицательную. Затем мы взвешиваем каждую кучу и получаем два значения, скажем, 5 граммов отрицательного и 4 грамма положительного значения. Четыре грамма нейтрализуют друг друга, оставляя нам 1 дополнительный грамм отрицательного веса — назовем это значение «волновой суммой». Таким образом, средняя волновая сумма равна $-1g/9g = -1/9$. Чтобы вычислить число, пропорциональное интенсивности света, которая всегда является положительной величиной, нам нужно возвести эту сумму в квадрат, чтобы получить интенсивность $1/81$.

Интенсивность слабая, поэтому наше смещение должно находиться где-то между кольцами.

Рисунок 4-7 фактически находится в точке баланса. Именно между

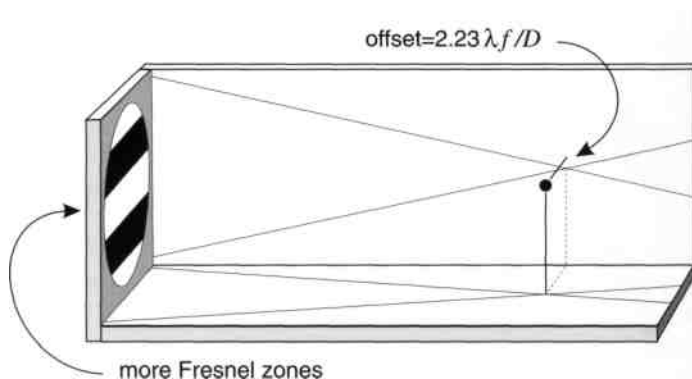


Рис. 4-8. Второй минимум дифракционной картины при $2.23 \lambda f / D$

кольца, и поэтому темная область должна нейтрализовать светлую область, в зависимости от качества рисунка и нашего умения обращаться с воображаемыми ножницами. На рис. 4-8 показано следующее темное кольцо, расположенное дальше от оси. Здесь наклон хуже, поэтому зон видно больше, и видно еще две полоски. Между смещениями Рис. 4-7 и Рис. 4-8 находится первое дифракционное кольцо, где положительная и отрицательная части хуже всего нейтрализуют друг друга. Там видно пять полосок, но две внешние очень тонкие.

Из закономерностей Френеля важно усвоить то, что сумма волн неэффективна везде, за исключением точного фокуса. Подумайте еще раз о плотной бумаге. При фокусировке диафрагма везде имеет один и тот же знак, ничего не отменяет. Сумма волн равна $9g/9g$, а интенсивность равна 1. Даже на самой яркой части первого кольца вы получите неотмененную сумму волн около $1,2g/9g$ и интенсивность света всего лишь около $1/57$ самого яркого значения. Чем дальше вы уходите в сторону, тем хуже становится ситуация. В какой-то момент вы понимаете, что все, что вы вырезаете, — это почти одинаковые узкие ленты плотной бумаги.

4.3.3 Зоны Френеля с расфокусировкой

Волновой фронт меняет характер, когда окуляр расфокусирован. На рис. 4-9 показана aberrация, вызванная апертурой, если окуляр отведен назад. Получающиеся зоны Френеля имеют круглую форму, как на рис. 4-10. При прохождении половины длины волны рисунок меняется на противоположный, образуя отрицательное пятно в центре. Однако квадрат суммы волн одинаков, поэтому интенсивность имеет то же положительное значение. Для местоположений датчиков за пределами фокуса с течением времени будет наблюдаться разрушение с появлением новых зон.

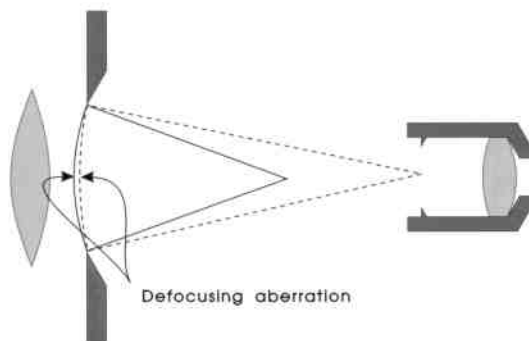


Рис. 4-9. Дефокусирующая aberrация. Вторичные источники вибрируют на сплошной дуге, однако фокальная плоскость окуляра находится в центре пунктирной дуги. Aberrация напоминает плавно вдавленную деформацию. Центр апертуры кажется задержанным относительно внешних частей.

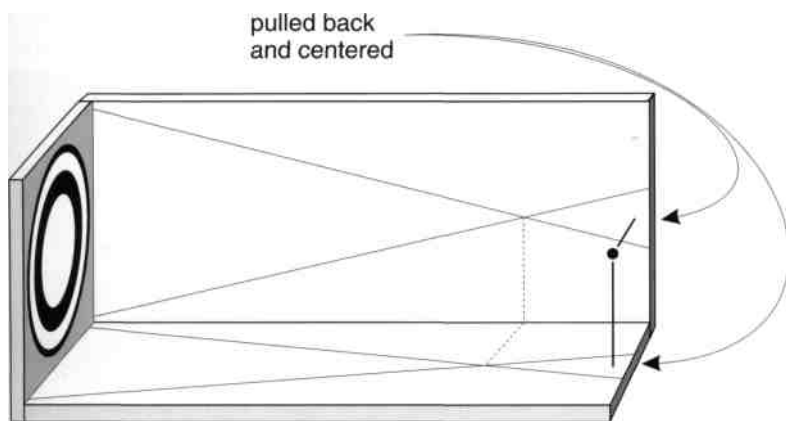


Рис. 4-10. Зоны Френеля при aberrации дефокусировки 1,7 длины волн.

край проема. Эти новые зоны движутся внутрь и исчезают в центре. Для мест внутри фокуса мы увидим идентичные образцы снимков, но появятся новые зоны, взрывающиеся из центра и удаляющиеся.

Несмотря на то, что фигура разрушается и мы могли бы выбрать любой снимок, фаза волнового фронта выбирается так, чтобы центральное пятно было самым большим. Общая величина aberrации дефокусировки на рис. 4-10 составляет около 1,7 длины волн. Это значение может быть определено путем подсчета цветов от центра к отдалению; край находится примерно на расстоянии 3,4 полуволновых зон.

Мы сознательно выбираем фазу волнового фронта так, чтобы площадь центральной положительной зоны была в точности равна площадям всех остальных зон, опоясывающих ее. Сумма волн должна быть равна нулю, когда количество зон равно 2, 4, 6 и т. д. Более сложные теории предсказывают, что интенсивность изображения на оси падает до нуля, когда абберрация дефокусировки составляет 1, 2, 3 ... длины волны, точно так же, как предсказано этой простой моделью зоны Френеля.

При движении вверх, как на рис. 4-11, виден эффект смешивания абберраций наклона и дефокусировки. На рис. 4-12 представлен тот же образец изображения со стрелкой, указывающей расположение датчика на изображении. Край геометрической тени показан в виде светлого кольца.

Сильное внешнее кольцо, наблюдаемое на большинстве расфокусированных изображений, соответствует месту, где центральное пятно Френеля начинает соскальзывать с апертуры. (Фактически, в начале геометрической тени оно наполовину исчезло.) Таким образом, немного более яркое краевое кольцо на расфокусированных изображениях представляет собой последний расцвет центральной зоны Френеля перед тем, как она исчезнет и наступит тьма. Обратите внимание, как самые яркие части диска не заполняют круг геометрической тени и как часть света покинула диск и заняла тень. Если бы этот узор описывался лучевой оптикой, диск представлял бы собой абсолютно безликий круг с совершенной темнотой за пределами радиуса геометрической тени.

На этом изображении показано еще одно интригующее поведение. Мягкие кольца террасируют рисунок даже в теневой зоне. По мере дальнейшего смещения датчика в поле зрения появляются новые зоны Френеля, каждая из которых вызывает колебание интенсивности.

4.4 Узлы и пучности

Определенные места в объеме вокруг самой яркой точки изображения кажутся темными по сравнению с их непосредственным окружением. На рисунках 4-7 и 4-8 показаны две такие точки на первом и втором темных кольцах. При дефокусировке темнота на оси наблюдается, когда количество зон Френеля четное. Эти места кажутся тихими, в то время как вокруг них бушует суматоха. Это нули, чаще называемые *узлы*. Противоположностью узла является *пучность*, где волновое действие наиболее сильное, а яркость достигает локального максимума. Хорошим примером пучностей являются вершины дифракционных колец, а также самая высокая точка самого центрального пятна изображения.

Все видели узлы, хотя многие об этом не знают. Если внимательно посмотреть на гитарную струну, то можно увидеть простейший тип вибрации на рис. 4-13а. Есть два узла на бридже и ладу и один пучность в центре. Эта ситуация называется *стоячая волна*. Конечно, наличие двух узлов на краях струны вряд ли является сюрпризом. Эти позиции механически ограничены, и вряд ли можно ожидать значительного изменения.

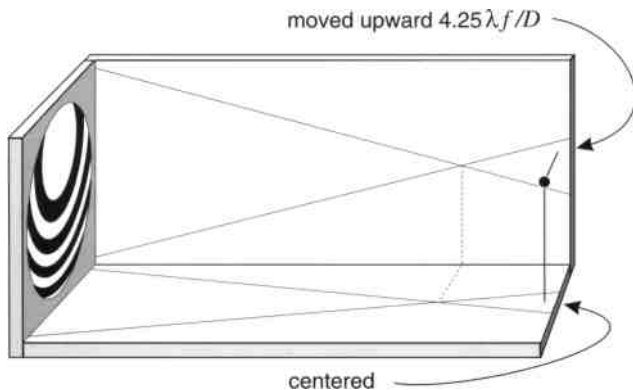


Рис. 4-11. Смещенная от центра диаграмма зоны Френеля в виде «яблочка», показывающая две аберрации (дефокусировка и наклон), смешанные вместе.

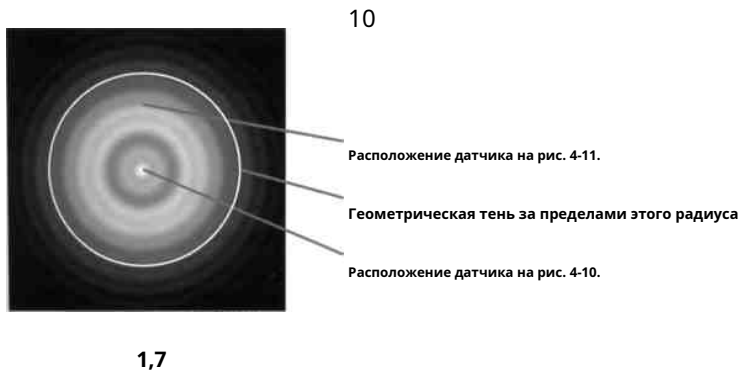


Рис. 4-12. В указанном месте интенсивность рассчитывается как сумма зон Френеля на рис. 4-10 и 4-11. Яркое кольцо указывает границу геометрической тени.

Но узлы могут свободно висеть в пространстве, казалось бы, не удерживаемые никакими физическими ограничениями. Если вы дернете гитарную струну, как показано на рис. 4-13b, вы увидите рисунок, показанный на рис. 4-13c, вскоре после того, как отпустите струну. По прошествии большего времени ситуация превратится в ситуацию а). Когда вы передергивали струну, удар содержал множество частот (вспомните Фурье и функцию импульсного отклика). Самыми сильными частотами являются «основные» в а) и «первая гармоника» в в). Не существует других видов вибрации, кроме кратных основной частоте.

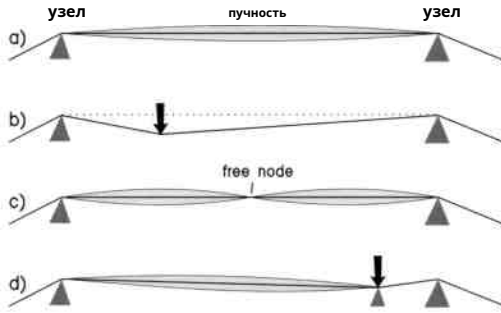


Рис. 4-13. Узлы и пучности гитарной струны.

Ситуации а) и в) различаются на октаву. Что, если вам нужен тон где-то посередине? Вы не сможете найти его при фиксированном расстоянии, разделяющем лад и бридж. Чтобы получить промежуточный тон, вы должны нажать на струну на другом ладу (рис. 4-13d), что подразумевает новую основную и новую гармоническую последовательность.

Но если бы узлы и пучности были обнаружены только в струнных инструментах, они вряд ли были бы полезны для обсуждения дифракции. Однако стоячие волны есть повсюду. Например, они видны на поверхности быстро вибрирующих жидкостей. Эти стоячие волны иногда можно увидеть в кофейной чашке или другом контейнере, трясущемся на той же столешнице, что и прибор или инструмент с быстрым электродвигателем. Поверхность кажется почти неподвижной, хотя интеллектуально вы знаете, что скорость водных волн намного выше, чем почти неторопливый дрейф волн. Эквивалентом перемишки и лада в данном случае является край емкости, а стоячая волна возникает на двумерной поверхности жидкости. Если контейнер круглый, наиболее вероятная вибрация радиально-симметрична. Если он квадратный, вы увидите своего рода шахматную фигуру.

Трехмерный корпус иногда можно найти в старой микроволновой печи. Схемы приготовления в микроволновой печи обычно перемешиваются с помощью скрытого металлического вентилятора, расположенного над выходным отверстием микроволнового передатчика. Эти вентиляторы могут выйти из строя, и единственное заметное изменение заключается в том, что приготовление пищи становится очень неравномерным. Устанавливается стационарная стоячая волна, которая перегревается в пучностях и оставляет пищу в узлах почти сырой.

Даже при работающем вентиляторе отверстия и яркие участки могут мешать равномерному приготовлению пищи. По этой причине во время приготовления продукты необходимо перемещать хотя бы один раз. Каждый сталкивался с крошечными горячими точками, которые поджигают перегретый попкорн в микроволновой печи. Эти антиузловые области имеют диаметр примерно 1-2 см.

При чем тут бридж и лады? Микроволновая печь металлическая.

полость, стенки которой являются узлами, поскольку электрические проводники не могут иметь глубоко внутри себя электрические поля. Поскольку любая форма электромагнитного излучения имеет как электрические, так и магнитные поля, распространяющиеся одновременно, металлическая полость эффективно отражает микроволны. Даже в окне вы смотрите через металлическую сетку, которая для микроволн ведет себя как сплошная металлическая стена. Еда всегда размещается на низком подносе, потому что она не нагревается прямо напротив узла.

Вот связь с оптикой телескопа. Апертура телескопа колеблется с заданной неизменной частотой (как микроволновый передатчик). Яркие места на изображении — это эквивалент горячих точек в духовке. Темные места подобны холодным местам, в которых еда остается сырой.

Таким образом, мы можем интерпретировать поведение дифракционной структуры вблизи фокуса как стоячую волну. Срез фокальной области изображения, имеющего небольшую сферическую aberrацию, показан на рис. 4-14. На этом рисунке показано, как свет сжимается, чтобы сфокусироваться, и снова расширяется за его пределы, причем область ближе к объективу слева над меткой —2 и область дальше от объектива над меткой 2. Он напечатан с очень низким контрастом к подчеркнуть низкоуровневую структуру. Узлы и пучности легко идентифицировать. Поскольку апертура представляет собой жесткую геометрическую структуру, есть места, где волна не соответствует правильно, и места, где вибрация предпочтительна.

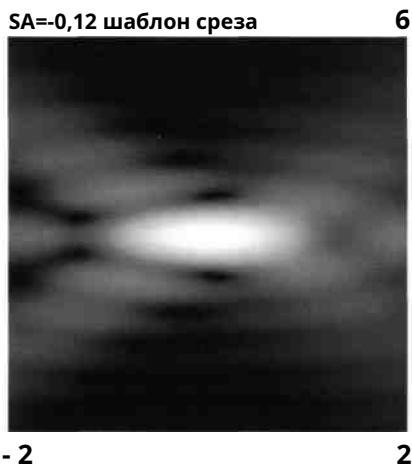


Рис. 4-14. Продольный срез вблизи фокуса апертуры с небольшой сферической aberrацией.

Эта ситуация очень похожа на ручей, текущий по каменистому руслу. Над одним камешком поверхность воды приподнимается на небольшое расстояние.

количество. В других местах поверхность кажется нетронутой. Общий вид обманчиво застыл, и мы забываем, что всего за несколько мгновений вся вода двинулась вниз по течению и была заменена пресной водой, занимающей ту же конфигурацию.

Точно так же мы интерпретируем стоячую волну изображения как своего рода фиксированный артефакт, но энергия проходит через инструмент со скоростью света. Узловые точки, которые можно увидеть в виде темных колец на сфокусированном изображении и гофров на расфокусированном изображении, вызваны геометрией ситуации. Они больше похожи на гальку, чем на воду. Аберрации нарушают геометрию и тем самым влияют на стоячие волны.

4.5. Другие отклонения — функция зрачка

Аберрации наклона и дефокусировки являются исправимыми ошибками. Правда, если изображение расфокусировано, вы мало что увидите, но вы можете вернуть четкое изображение, просто повернув ручку. Ошибка наклона просто требует от вас перенаправить взгляд в центр изображения звезды. Наблюдатель не может избавиться от размытия изображения, вызванного дифракцией, но если увеличение достаточно мало, то разброс приемлемо мал.

До сих пор речь шла в основном об идеальных апертурах. Что происходит, когда какое-то несовершенство приводит к искривлению волнового фронта при прохождении через апертуру? Наши маленькие вторичные источники, или излучатели, больше не находятся на поверхности сферы. Они ограничены некоторой формой поверхности, для которой невозможно найти уникальное положение фокуса. В рисунках узлов образуются асимметрии (как на рис. 4-14).

В наилучшем положении фокусировки эти излучатели больше не видятся в одной фазе. Сумма волн никогда не может равняться всей площади апертуры. Конечно, для большинства реалистичных аберраций, рассматриваемых в этой книге, ошибки в лучшем случае фокусировки никогда не станут настолько большими, чтобы для их проявления потребовалось бы более одной грубой зоны Френеля. Лишь после того, как аберрация достигнет $1/2$ длины волны от пика до минимума, на апертуре при наилучшей фокусировке появится более одной зоны Френеля. Более точный способ расчета волновой суммы покажет, что пиковая интенсивность всегда меньше единицы для аберрированных апертур.

Эти зоны Френеля являются хорошим обучающим устройством, но они не позволяют получить достаточную градацию, чтобы можно было подробно рассмотреть, что происходит с излучателями в апертуре. Для этого нам необходимо представить *функция зрачка*. На данный момент мы можем определить функцию зрачка как поверхность, содержащую информацию как о фазе, так и о передаче аберрации. Более точно оно определено в Приложении Б.

Аберрационные искажения волнового фронта при простой дефокусировке представлены на рис. 4-15. Апертура показана ниже волнового фронта. Зоны Френеля представляют собой контуры такой поверхности. Передаточная часть функции зрачка

выглядит как плоская столешница, потому что это отверстие имеет равномерную передачу к краю. Большинство функций зрачка, которые появятся позже, будут иметь схожее поведение при передаче сигнала «вкл-выкл». Аберрационная функция отображается чаще всего, потому что она, как правило, является наиболее интересным компонентом полной функции зрачка.

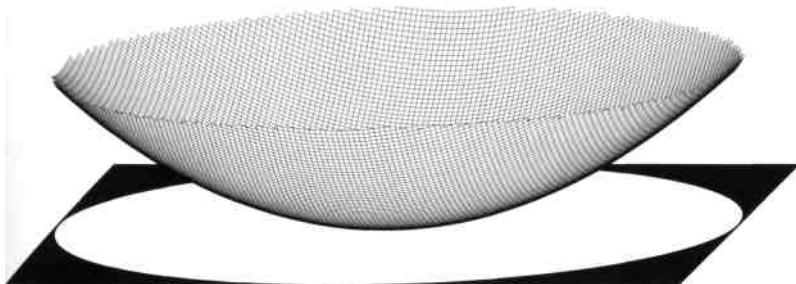


Рис. 4-15. Аберрационная функция дефокусировки: апертура обозначена черным цветом под поверхностью волнового фронта. Направление фокуса вверх.

На рис. 4-15 показана функция aberrации дефокусировки вне фокуса. Аберрационная функция внутри фокуса представляет собой невысокий холмик. Для идеальной апертуры функция aberrации будет представлять собой плоскую пластину. Все оптические трудности, встречающиеся в этой книге, связаны с функцией зрачка. Функция зрачка — это не просто концептуальное устройство, она содержит в себе суть формирования изображения в телескопе. Математические операции над функцией зрачка приводят к дифракционной картине и передаточной функции модуляции.

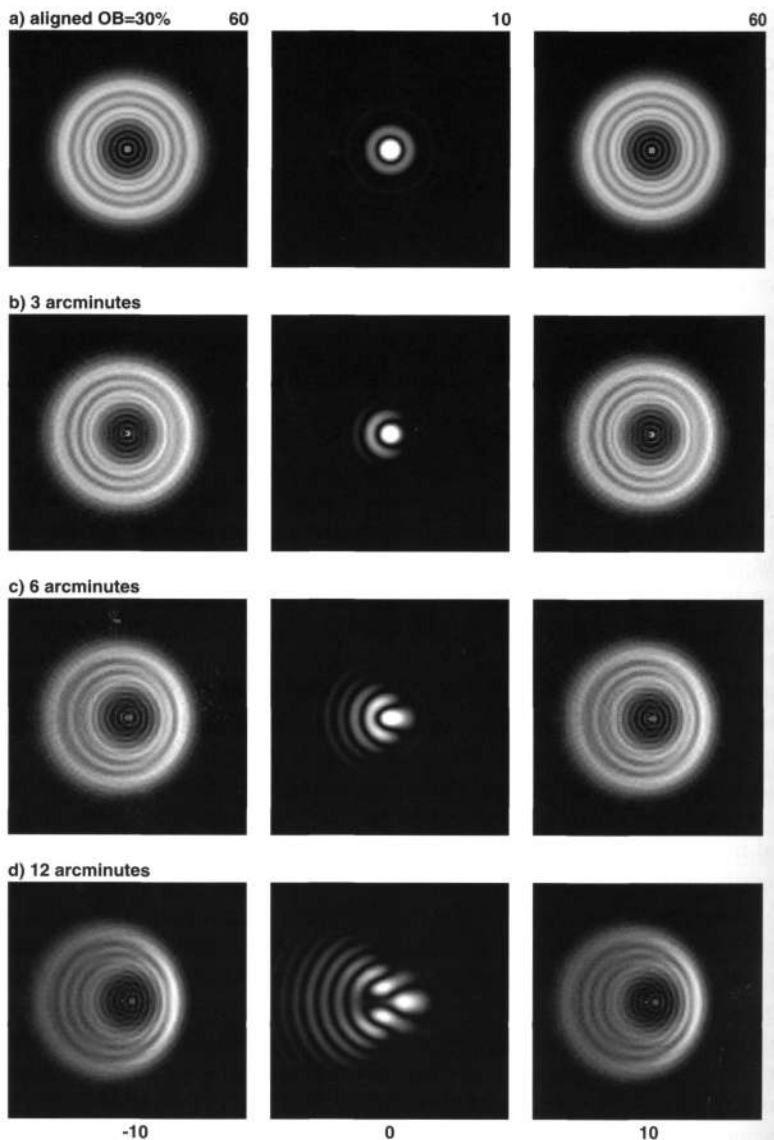


Рис. 6-9. Звездные тестовые диаграммы, показывающие все более сильное смещение ньютоновского рефлектора диаметром 10 дюймов (250 мм) $f/4,5$: а) ожидаемая картина, если телескоп идеально выровнен, б) смещение на 3 угловые минуты (наихудшее смещение, которое обеспечивает приемлемое изображение), в) смещение на 6 угловых минут и г) смещение на 12 угловых минут. Сфокусированные узоры увеличены в 6 раз по сравнению с несфокусированными узорами. Информацию о маркировке см. в Приложении D.

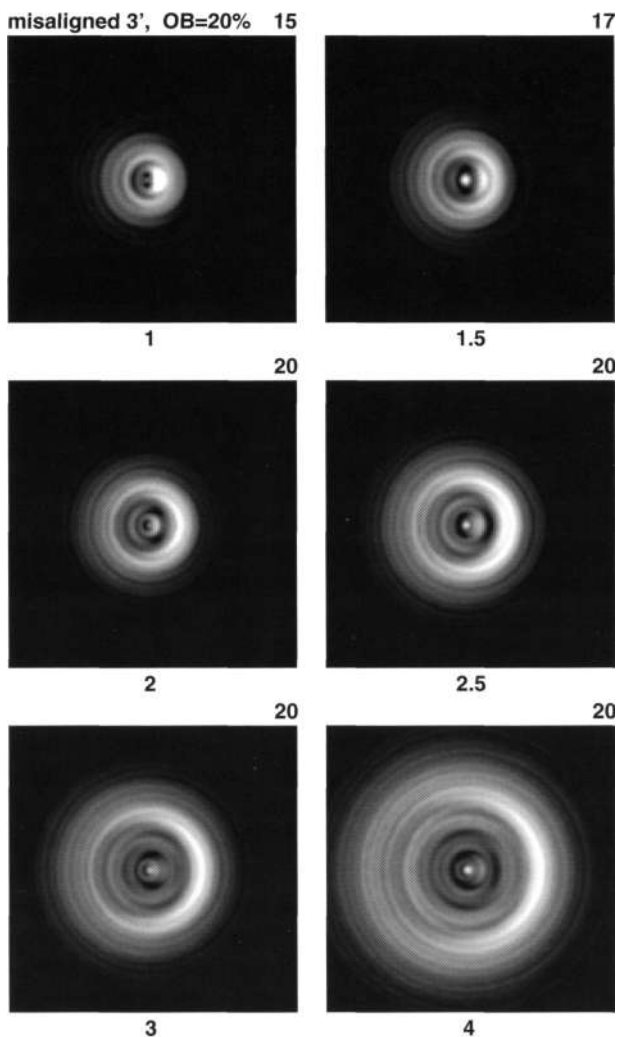


Рис. 6-10. Смещение в 3 угловые минуты на рис. 6-9 при дефокусировке регулируется от 1 до 4 длин волн. Несоответствие четко видно.

чтобы сопоставить наблюдаемую картину с винтом регулировки ячейки.

Ньютоновец имеет два зеркальных отражения, в том числе одно под прямым углом. Возможно, некоторые люди способны достаточно хорошо визуализировать трехмерную ситуацию, чтобы чисто логикой определить, какой винт повернуть, но таких мало. Лучший способ найти этот винт — решить, на какой угол часов вы хотите переместить изображение, скажем, на 7 часов. Затем переместите окуляр на длинную

расстояние вне фокуса. Поместив руку на оптический путь телескопа и отметив, где на расфокусированный диск попадает тень, можно решить, какая часть зеркала соответствует определенному часовому углу. Вы можете перенести тень руки либо на 7 часов, либо на 1 час. Затем следуйте этой ориентации обратно вдоль трубки к зеркальной ячейке.

Когда вы проведете эту линию обратно к зеркалу, вы выйдете либо рядом с винтом, либо через трубку от него. Немного отрегулируйте этот винт в любом направлении. Не важно, в какую сторону вы его повернете, важно лишь запомнить модификацию. Отцентрируйте звезду и посмотрите, станет ли ситуация хуже или лучше.

Если хуже, устраните повреждение и поверните его в другую сторону. Посмотрите на изображение еще раз. Теперь оно должно улучшиться. Выберите новое направление регулировки и повторите весь процесс. Всегда повторно центрируйте звезду, прежде чем принять решение о следующем шаге. Если регулировка ячейки достигает нижнего предела и вы не можете затянуть винт, помните, что ослабление двух других эквивалентно.

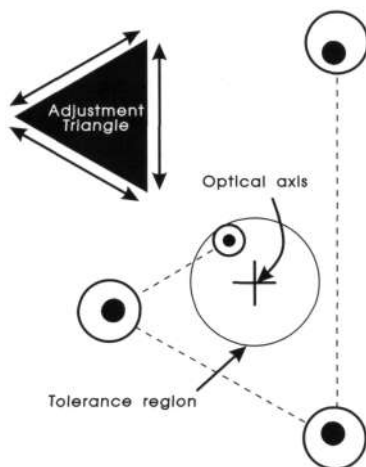


Рис. 6-11. Корректирующий треугольник трехсторонней ячейки и первые несколько шагов точного выравнивания на тестовом изображении.

Когда вы ориентируетесь на точно выровненное зеркало, вы должны следовать по пути, подобному показанному на рис. 6-11. Наклонять зеркало можно только по краям регулировочного треугольника. Помните, что на самом деле вы меняете положение оптической оси, а не изображения, поэтому вам нужно переместить изображение в направлении, обратном всем этим настройкам.

Лично меня движение изображения очень сбивает с толку, поэтому я даже не наблюдаю за сдвигом изображения в поле зрения. Я просто решаю угол часов и использую

описанный выше метод проб и ошибок. Опять же, важнее действовать медленно и методично, чем понимать каждый поворот. Путь, показанный на рис. 6-11, не является единственным решением этого начального условия и даже не самым эффективным, но он успешен.

6.5.2 Рефрактор

Большинство меньших и менее дорогих рефракторов не могут быть коллимированы, поскольку производители предпочитают фиксировать заводскую регулировку. Рассуждая, что некомпетентные пользователи не могут испортить юстировку, они не настраивают телескопы. К счастью, в небольших рефракторах используется конструкция с длинным фокусом, которая допускает большие перекосы, поэтому отсутствие регулировок не часто влияет на изображение.

В последние годы, отчасти из-за возрождения интереса к большим рефракторам и появления новых апохроматических и усовершенствованных конструкций стекол, используемых при низком фокусном отношении, рефракторы снова снабжаются регулируемыми кюветами. Если ваш рефрактор не регулируется, вы все равно можете проверить его, используя метод, описанный здесь. К сожалению, телескопы без регулировок, возможно, придется вернуть производителю для коллимации. Возможно, придется вернуть и так называемые «телеобъективные» модели. Эти инструменты постоянно оснащены труднодоступным теленегативным усилителем в качестве последней группы линз, расположенной далеко внизу трубки.

Рефракторы не сложно отрегулировать. Геометрического выравнивания обычно бывает достаточно, поскольку их усовершенствованная оптическая конструкция обеспечивает широкое и хорошо скорректированное поле зрения. Проблема в технике и оборудовании. Рефрактор выровнен на столе с надетой крышкой объектива.

Обычное устройство, используемое для подачи света в затемненную трубку, называется окуляром Чешира (Сиджвик, 1955, стр. 185), модифицированной версией смотрового отверстия, используемого для настройки ньютоновского окуляра. В этом случае обычного комнатного света на полупрозрачной крышке банки с пленкой было достаточно, чтобы обеспечить достаточную подсветку, чтобы увидеть точку. Для рефракторов требуется гораздо больше света. Обычное стекло отражает лишь около 5% падающей на него энергии, пропуская остальную часть. Линзы с покрытием отражают еще меньше. Окуляр Чешира спроектирован так, чтобы обеспечить достаточно яркую цель, чтобы ее можно было увидеть даже после неэффективных отражений. Вы можете приобрести его в продаже или сделать самостоятельно.

На рис. 6-12 показан один из таких инструментов выравнивания. Он имеет длинную трубку с просверленным сбоку иллюминатором для проникновения света. В конец окуляра вставляется дюбель, срезанный под углом 45°, и просверливается так, чтобы вы могли видеть сквозь него. Косая сторона дюбеля хотя бы окрашена в глянцевый белый цвет, а если его поверхность из полированного металла, тем лучше. Внутренняя часть смотрового отверстия тщательно зачернена. Цель определяющего стопа – четко обозначить цель. В таком уточнении нет необходимости, если

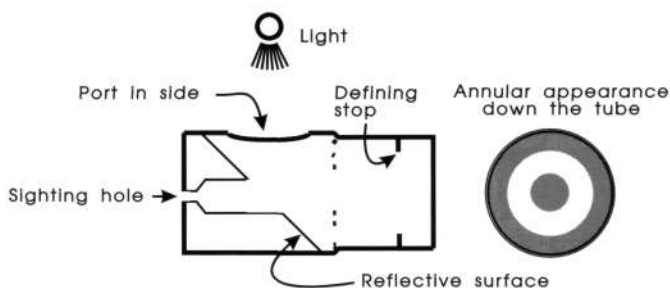


Рис. 6-12. Чеширский «окуляр». «Чешир» — это просто освещенная смотровая яма; он не содержит изогнутых или качественных оптических поверхностей. Рисунок отражающей мишени показан справа.

иллюминатор тщательно расположен.

Тейлор выступает за использование белой карты, наклоненной под углом 45° , в которой имеется смотровое отверстие, «Чешир» без «окуляра» (Taylor 1983). Однако это предложение предполагает, что при установке карты и центрировании смотрового отверстия необходимо уделить большое внимание. Зачерните небольшую эллиптическую область вокруг отверстия, чтобы вы увидели круг под углом 45° .

В большинстве регулируемых линзовых ячеек используется тот или иной вариант двухтактной системы, изображенной на рис. 6-13. Эта линзовая ячейка, если она точно отрегулирована и зафиксирована, чрезвычайно стабильна. Фланец телескопа закреплен на трубке, а линза плавает на трех регулируемых «нажимных» винтах, ввинченных в этот фланец. Поскольку нажимных винтов недостаточно для предотвращения падения ячейки, добавляется соответствующий натяжной винт, связанный с каждым нажимным винтом, в результате чего вокруг трубки образуется 6 винтов в трех группах. Поскольку пружины не используются, то при ослаблении одного винта каждой пары всегда необходимо подтянуть его партнер. На рис. 6-13 показано широкое разделение оправы линзы и фланца телескопа для демонстрации функции двухтактной пары. Фактически, в исходной конфигурации линзовая ювета всегда должна прилегать почти к фланцу телескопа. Корректировка будет более продолжительной, если разрыв невелик. Кроме того, большинство настоящих зеркальных ячеек тщательно убирают регулировочные винты, чтобы они не мешали четким линиям телескопа. Некоторые дизайнеры настолько умело прячут эти винты, что на первый взгляд инструмент может даже не показаться регулируемым.

Если вы можете выполнить эту настройку с помощью помощника, вам настоятельно рекомендуется это сделать. Пара минут согласования с двумя людьми быстро превращается в час, если вы делаете это самостоятельно. Поместите Чешира в фокусер.

Если вы используете Чеширский прицел для настройки ньютоновцев, убедитесь, что у вас есть достаточный ход фокусировки, чтобы глаз можно было расположить близко к фокальной плоскости, а при использовании светосильных зеркал убедитесь, что длинное визирное отверстие не закрывает внешнюю часть оптики.

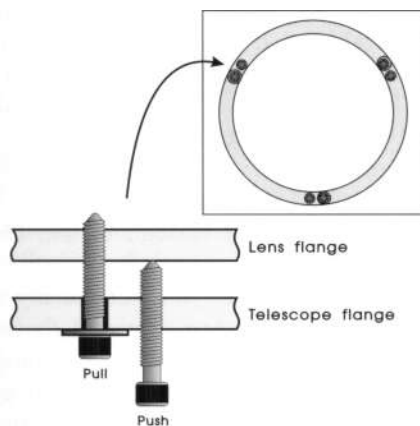


Рис. 6-13. Пара регулировочных винтов «тяги-толкай». На вставке показаны три пары, составляющие регулируемую ячейку.

и светите сбоку, тщательно прикрывая глаза от источника света. Если возможно, используйте телескоп с малым увеличением и близкой фокусировкой, глядя прямо через заднее отверстие. Эта уловка отвлекает ваш взгляд от яркого бокового освещения и расширяет отражения, чтобы вы могли легко их увидеть.

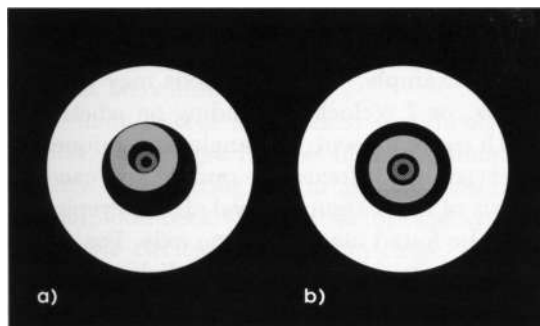


Рис. 6-14. Картины отражения сетки Чешира от апохроматического рефрактора с воздушным зазором 152 мм f / 12: а) до коллимации, б) после коллимации. Ни одна из юстировок не давала заметно отличающихся изображений в окуляре.

В одном апохроматическом рефракторе картина, показанная на рис. 6-14а, была видна в телескопический с близкой фокусировкой за смотровым отверстием Чешира. Большое кольцевое пространство было ярко-стального серого цвета и было размером примерно с Чешир. Должно быть, он отразился от поверхности воздух-стекло небольшой кривизны. Следующее кольцо внутри было пастельно-голубым и

несколько тусклее. Он был меньше, поэтому, должно быть, возник на более резко изогнутой поверхности. Самое маленькое кольцо было очень тускло-красного или пурпурного цвета и не было видно даже не увеличенным зрением. Возможно, он основывался на двух или более неэффективных отражениях на интерфейсах с покрытием.

Этот апохромат имел шесть поверхностей воздух-стекло, и были видны только три отражения сетки. В дублете ожидается меньшее количество отражений. Фактически, инструмент Чешира может оказаться не очень полезным для некоторых цементированных дублетов или рефракторов, в которых между линзами используются оптические контактные жидкости (масла или гели). Только одно отражение может быть достаточно ярким, чтобы его можно было увидеть, и вы не сможете сравнить его с другими.

Подстраивая двухтактные пары, можно быстро сделать отражение похожим на рис. 6-14б. Переверните телескоп и еще раз проверьте рисунок. Вы, вероятно, обнаружите, что погрешка линзы, встроенная в ячейку, ухудшает центрирование. В этом состоянии не о чем беспокоиться; просто отрегулируйте его до тех пор, пока он не будет примерно одинаково смещен в каждой ориентации. Даже в ситуации, показанной на рис. 6-14а, на изображении не было замечено рассогласования.

После того, как вы достигнете этого уровня выравнивания, все, как правило, готово. Вы можете проверить расфокусированное изображение, но, вероятно, не сможете обнаружить астигматизм, вызванный несопадением (хотя возможны и другие причины). Хорошо скорректированное поле типичного рефрактора огромно.

Если вы заметили некоторый астигматизм, вы, безусловно, можете попытаться скорректировать его с помощью звездного теста. Направление регулировки менее четкое, чем при наличии большего количества комы, поскольку направление оптической оси может быть либо вдоль короткого измерения расфокусированного звездного диска, либо вдоль длинного измерения. Например, оптическая ось может находиться в положении «4 часа», «10 часов», «1 час» или «7 часов», в зависимости от того, находитесь ли вы внутри или снаружи фокуса. Учитывая наличие комы, угол был уникальным.

Если окуляр установлен внутри фокуса, оптическая ось может находиться по обе стороны от окуляра. *короткий* ось астигматического овала. Если окуляр находится вне фокуса, оптическую ось можно найти *вдоль длинной* ось. По очевидным причинам вам следует выбрать определенную сторону фокуса и придерживаться ее.

Когда ячейка отрегулирована под углом 90° в правильном направлении, направление растяжения астигматизма быстро вращается. Кроме того, отмена регулировки и переход на такое же расстояние на другую сторону ничего не улучшит; он просто меняет вращение.

При юстировке звездой достаточно лишь подкрутить винты-толкатели. В конце концов, телескоп должен быть почти коллимирован. Небольшие изменения на винтах означают огромные изменения в фокальной плоскости. Если вам не удастся устранить астигматизм путем его коллимации, возможно, ваш телескоп страдает от защемления оптики или истинной цилиндрической деформации стекла.

Давайте рассмотрим общие этапы выравнивания и посмотрим, как они

применяется к рефракторам:

- 1. Установите осевую линию.** Ею определили как центр трубки.
- 2. Отцентрируйте оптические компоненты на этой оси.** Поскольку большинство рефракторов имеют только одну близко расположенную группу линзовых элементов, заключенную в тщательно обработанную ячейку, этот шаг был автоматическим. Предполагается, что фокусер перемещает окуляр вдоль оси. (В небольших недорогих рефракторах это условие не всегда выполняется.)
- 3. Установите наклоны элементов.** Этот шаг был достигнут путем центрирования отражения кольцевой сетки окуляра Чешира.
- 4. Повторите шаги 1, 2 и 3 в итеративном порядке.** Проверьте выравнивание, перевернув рефрактор, и регулируйте его до тех пор, пока отражение Чешира не будет выглядеть примерно одинаково смещенным при всех ориентациях.
- 5. Отрегулируйте только один элемент для точного выравнивания.** В этом шаге, вероятно, не было необходимости, но если бы он был, он бы состоялся по объективным причинам.

6.5.3 Шмидт-Кассегрен

Зеркала Шмидта-Кассегрена с эффективным фокусным соотношением $f/10$ имеют главное зеркало около $f/2$, умноженное на выпуклое вторичное зеркало с пятикратным увеличением. Центр кривизны главного зеркала должен находиться позади центра вторичного. Поскольку на большинстве систем Шмидта-Кассегрена главное зеркало не регулируется пользователем, эта регулировка должна быть правильно установлена на заводе, иначе телескоп не удастся коллимировать.

Неприемлемую регулировку главного зеркала трудно диагностировать, но некоторые подсказки существуют. Сначала выполните остальную часть процедуры коллимации в меру своих возможностей. Затем, используя смотровое отверстие (описанное выше в разделе «Ньютоновское выравнивание»), посмотрите назад через оптическую систему. Если вы не видите абсолютно концентрических кругов, колец внутри колец, ваше лучшее выравнивание может быть своего рода компромиссом. Вы будете компенсировать вторичную обмотку, чтобы частично компенсировать aberrации, вызванные смещением первичной обмотки. Тем не менее, смещение главного зеркала должно быть достаточно серьезным, прежде чем вы действительно сможете обнаружить некруглость в этих крошечных отражениях.

На передней стороне прибора легче обнаружить смещение главного зеркала. Для 200-мм объектива Шмидта-Кассегрена расположите глаз на расстоянии пары футов от передней части (около $\frac{1}{2}$ метра) и отцентрируйте самое большое отражение вторичной обмотки за пределами задней части вторичной обмотки. Тщательно отрегулировав положение глаза, вы сможете увидеть отражение вторичной линзы в виде тонкого кольца за пределами истинной вторичной линзы. Теперь вы находитесь ближе к оси выравнивания главного зеркала. Если зеркало серьезно смещено,

должно быть очевидно, что эта ось не совпадает с осью трубы, поскольку внутренняя часть телескопа будет выглядеть наклоненной.

Еще одна подсказка связана с тем, как установлены эти первичные обмотки. Фокусирующее действие фактически перемещает зеркало вперед. Центр зеркала приклеен к пластине на передней части осевого фокусера. Часто эти зеркала выходят из строя из-за какой-либо механической неисправности фокусера. (Возможно, во время транспортировки он сильно встряхнулся.) Когда вы фокусируете инструмент, изображение не расфокусируется в фиксированном месте, а катится или петляет по полю. В любом случае такое anomальное поведение фокусировки, если оно достаточно серьезное, требует заводского обслуживания.

А пока предположим, что у вас есть хорошо отрегулированное главное зеркало. Единственная свободная регулировка — наклон вторичного зеркала. Если у вас сильно смещен Шмидт-Кассегрен, возможно, вам придется грубо выровнять его, посмотрев через смотровое отверстие. Отцентрируйте отражение главного зеркала во вторичном. Обычно этот шаг не нужен.

Последний шаг — точное согласование со звездным тестом. Вы можете навести телескоп днем на искусственную звезду или ночью на настоящую звезду. Телескоп Шмидта-Кассегрена является наиболее удобным для юстировки из примеров телескопов из-за его компактности. Если у вас длинные руки, вы действительно можете дотянуться до регулировочных винтов, находясь за окуляром. Конечно, проще всего коллимировать ситуацию, когда два человека выкрикивают инструкции, а другой пытается им подчиняться.

Вторичная ячейка монтировки Шмидта-Кассегрена представляет собой разновидность диагональной монтировки Ньютона. В обоих случаях ослабление одного винта уравнивается затягиванием двух других. При изменении наклона вторичного зеркала необходимо добиться выравнивания, сохраняя при этом оправу зеркала затянутой.

По мере приближения к коллимации может показаться целесообразным слишком сильно затянуть один винт. Избегайте такого ярлыка. Вторичное зеркало вмонтировано в стекло, и корректор можно сломать. Также вторичное зеркало держится на жесткой пластине, но эту пластину можно согнуть и зеркало растянуть. Наконец, вы можете выдернуть гаечный ключ из гнезда, прилагая к нему усилия, и в конечном итоге поцарапать корректор. Затяните его плотно, но не прилагайте усилий. Если вам нужно переместить его еще немного, вместо этого ослабьте два других винта.

Смещенная система Шмидта-Кассегрена будет вызывать такое же поведение звездного теста, как было показано ранее для ньютоновской модели. Выполните звездный тест без колена под углом 45° . У вас станет на один потенциальный источник аберрации меньше. и вы сможете наблюдать угол оптической оси. Правильный винт для поворота определяется напрямую. Вскоре вы сможете центрировать тень вторичного объекта на изображении. (Используйте тот же метод, который использовался в ньютоновском методе.) Уточните юстировку, повернувшись к более тусклой звезде и уменьшив ее расфокусировку, или, если зрение отличное, оставьте телескоп в фокусе и

отрегулируйте изображение для симметрии.

Вкратце, этапы выравнивания Шмидта-Кассегрена были следующими:

- 1. Установите осевую линию.** Эта линия по определению соосна трубке.
- 2. Отцентрируйте оптические компоненты на осевой линии.** Центрирование установлено на заводе и, следовательно, не подлежит регулировке.
- 3. Установите наклоны элементов.** Наклон корректора, по большому счету, неважен. Наклон первичного элемента является заводской настройкой и сильно зависит от состояния механизма фокусировки. Регулировать можно только наклон вторичной обмотки.
- 4. Повторите шаги 1, 2 и 3 в итеративном порядке.** Поскольку многие грубые настройки выравнивания находятся вне контроля владельца, итерация невозможна.
- 5. Отрегулируйте только один элемент для точного выравнивания.** Этот шаг объединен с шагом 3. Он выполняется на звезде или искусственном источнике-обсуре, расположенном на расстоянии около 50 метров или дальше; регулируется только вторичка.

Если после выполнения этих шагов ваш телескоп по-прежнему отображает асимметричные изображения, его придется вернуть производителю. Первичный минор, вероятно, наклонен. Отсутствие регулировок главного зеркала, пожалуй, самая слабая черта коммерческих конструкций Шмидта-Кассегрена.

Глава 7

Воздушная турбулентность и трубные токи

Некоторые источники аберраций не имеют ничего общего с самим телескопом. Они возникают из-за необходимого погружения прибора в изменяющуюся оптическую среду. Свет астрономических объектов должен пересекать турбулентный столб воздуха, простирающийся на многие километры от верхних слоев атмосферы до фокальной плоскости инструмента.

Наблюдатель-любитель мало что может сделать с турбулентностью в верхних слоях атмосферы, но ее легко распознать в звездном тесте. Многие из проблем, описанных в этой главе, со временем исчезают сами собой, особенно те, которые связаны с охлаждением телескопа или его непосредственного окружения. Цель здесь — научить вас обнаруживать отклонения, возникающие из-за движения воздуха, предотвращать их, насколько это возможно, и распознавать, когда они исчезают. Изучение звездного поведения атмосферы в вашем регионе также позволит вам идентифицировать те редкие периоды необычайно устойчивого изображения, благоприятного для больших увеличений.

7.1. Воздух как преломляющая среда.

Показатель преломления воздуха очень близок к показателю вакуума, но заметно отличается. При температуре 0° Цельсия сухой воздух при давлении на уровне моря имеет показатель преломления 1,00029, тогда как показатель вакуума определяется точно как единица (CRC 1973). Кажется, из-за такой небольшой разницы не стоит беспокоиться, но волна, проходящая через воздух внутри телескопа с фокусным расстоянием 1,5 метра, замедляется по сравнению с прохождением через вакуум примерно на 791 длину волны.

Предполагая, что воздух является примерно идеальным газом и что дробная часть показателя преломления изменяется линейно с температурой, можно легко определить запаздывание при небольшой разнице температур. Напомним, что 0° Цельсия — это 273° Кельвина в единицах абсолютной температуры. Таким образом, разница температур в 1°K на расстоянии 1,5 метра приводит к задержке

из $791/273$ длины волны на градус Кельвина, или около 2,9 длин волн/°K (1,6 длины волны/°F). Теперь протяните воздушную трубку вверх через атмосферу на много километров над головой, причем каждый слой имеет разную температуру. Задержки распространения могут быть значительными.

Однако не имеет значения, задерживается ли луч света равномерно. Ведь свет проделал долгий путь. Кого волнует, если оно придет немного поздно? Нас интересуют только изменения направления или времени прихода света по мере того, как свет попадает в разные части длинного и тонкого воздушного цилиндра перед нашими приборами. Мы обнаруживаем эти различия, когда видим, что изображение ухудшилось из-за плохого зрения. Когда мы смотрим на атмосферу Земли, мы надеемся на однородность давления и температуры, которая часто не существует. Некоторые части волнового фронта находятся на небольшом расстоянии позади других частей волнового фронта. Такие aberrации могут образовывать различия в интенсивности и видимом расположении (т. е. «мерцание»), но их наиболее частым эффектом при больших значениях диафрагмы является размытие изображения.

В защиту неба, возможно, мы ожидаем слишком многого, когда смотрим вверх сквозь весь этот материал и требуем идеальных изображений. В конце концов, общее давление атмосферы такое же, как давление воды на высоте более 30 футов. Разрешение менее угловой секунды не ожидается на дне бассейна для прыжков в воду. Тем не менее, такое разрешение действительно наблюдается на изображениях, видимых через атмосферу. В исключительные ночи атмосфера удивляет нас, становясь удивительно спокойной.

Тем не менее, прежде чем атмосферные эффекты станут проблематичными, должен существовать механизм, вызывающий мелкомасштабные различия в показателе преломления. Воздух, по своей газообразной природе, не склонен поддерживать разницу в давлении или температуре, за исключением широких слоев, вызванных силой гравитации. Воздух смешивается, усредняя различия до тех пор, пока не будет преобладать слоистая однородность. Статистическая неоднородность не сохранится без смешивания. Два механизма, представляющие наибольший интерес для испытателей телескопов, — это атмосферная турбулентность и течения в трубе.

7.2 Турбулентность

Если бы атмосфера менялась медленно, турбулентность никогда бы не началась. Однако атмосфера часто вынуждена двигаться быстро. Когда солнечный свет накапливает энергию на земле, он нагревает воздух непосредственно над ней. Этот воздух расширяется, становясь легкой массы воздуха непосредственно над ним. Ситуация становится нестабильной или «активной», и более плотный воздух падает, заменяя более теплый воздух под ним. Он движется достаточно быстро, чтобы создать турбулентность.

Этот тип движения жидкости называется неустойчивостью Рэля-Тейлора. Полностью наполните пустую бутылку из-под газировки водой и переверните ее игральная картой над отверстием. Осторожно уберите руку. Вода не

выпасть из контейнера (Walker 1977). Если бы вы внезапно вытащили карту, вы бы увидели бутылку с водой, зависшую над пространством в воздухе.

Вся вода не может упасть сразу. Давление воздуха удерживает воду так же, как столбик ртути удерживается в барометре. Все молекулы воды держатся друг за друга, поэтому не отпадают по отдельности.

Случайные покачивания поверхности заставят одну часть слегка деформироваться вверх, а другую — немного вниз, быстрее, чем люди могут это почувствовать. Это все, что нужно. Как только этот процесс запускается, он едет сам. Пузырь поднимается и наконец обрывается. Бутылка опорожняется, но происходит это неравномерно. Нестабильность должна формироваться снова и снова. Бутылка шумно стекает, мягко пиная вас в руке.

Кстати, неустойчивости не будет, если достаточная внешняя сила удерживает поверхность на уровне. В случае с карточкой поверхность ограничивалась структурной прочностью бумаги. К тому времени, когда отверстие уменьшится до размера соломинки из-под газировки, уже одно поверхностное натяжение обеспечит достаточную силу, чтобы преодолеть нестабильность. Вы можете поднять узкие столбы воды, просто заткнув кончик соломинки.

В атмосфере неустойчивая область не окружена ни одной бутылкой, но по существу происходит тот же процесс. Когда холодный воздух падает, из-за неэффективности края области падения не становятся гладкими. Падение происходит достаточно быстро, поэтому образуются крошечные вихри, но вихри меньшего размера не движутся со скоростью основной конвективной ячейки. По краям этих вихрей образуются еще более мелкие вихри. Наконец завитки теряют свою сложность. В каком-то небольшом масштабе модель коллективного движения нарушается, и энергия выражается в тепле. Все реальные случаи течения жидкости, такие как потоки и крупные конвективные ячейки, макроскопически движутся только в среднем. Если рассматривать их под микроскопом, они турбулентны.

7.2.1 Функция аберрации

Статистические изменения волнового фронта обычно обрабатываются с помощью полуаналитических процедур. Эти процедуры, которые обычно принимают гауссову форму случайных изменений, весьма полезны для расчета MTF при длительной выдержке и других особенностей, связанных с шероховатыми поверхностями (Шредер 1987, стр. 315). Однако они не позволяют нам просчитать внешний вид одного-единственного примера изображения. Это поведение, усредненное по многим таким шероховатым апертурам.

Метод, используемый здесь для моделирования волнового фронта, называется фрактальным алгоритмом смещения средней точки. Его используют для создания удивительно реалистичных фрактальных ландшафтов (Пейтген и Саупе, 1988, стр. 96; Мандельброт, 1983; Харрингтон, 1987). Он также может визуализировать искусственный псевдослучайный волновой фронт.

сразу после того, как он прошел через отверстие. Фракталы были впервые применены к задачам дифракции М. В. Берри в основополагающей статье «Дифракталы», в которой *фазовый экран* впервые появились (Berry 1979, 1981). Используемый здесь метод является адаптацией более ранней статьи, в которой одномерная вариация алгоритма отклонения средней точки использовалась для расчета дифракционных картин щелевого типа (Suiter 1986a).

Поскольку фрактал должен заполнять область двумерной сетки, мы можем удобно приступить к двухэтапной итерационной процедуре. Алгоритм начинается с того, что четырьмя углами сетки 129×129 точек произвольно присваивается нулевая высота (рис. 7-1a). На рис. 7-1 показано только расположение точек; отклонение перпендикулярно бумаге.

Для первой половины первой итерации (рис. 7-1б) смещение следующего более точного деления рассчитывается как среднее значение предыдущих четырех заданных точек на концах пунктирных кривых (для первой итерации это среднее значение равно нулю) плюс-минус некоторое случайное отклонение ($\pm \Delta z$). Это значение присваивается центральной точке. Точки, установленные только во время каждой полуитерации, черные; все ранее назначенные точки белые. Точки сетки 129×129 , которым еще не присвоены значения, не отображаются.

Во второй половине первой итерации края заполняются. Четыре ближайших точки снова усредняются, предполагая, что точки за краем области равны нулю, и к этому числу добавляется еще одно плюс-минус отклонение. На этот раз максимально допустимое отклонение перед назначением делится на 2. Обратите внимание, что каждый полный цикл итерации усредняет положения точек, сначала ориентированных по диагоналям устанавливаемой точки, а затем во второй половине усредняет под прямолинейными углами. По понятным причинам этот алгоритм можно также назвать методом «x+».

В начале второй итерации максимально допустимое смещение еще раз делится на 2, чтобы получить $\pm \sqrt{2}/2$. В начале третьей итерации оно составляет $\pm \Delta z/4$ и так далее. Таким образом, размеры ячеек уменьшаются точно с той же скоростью, что и максимальное отклонение, создавая условия, при которых видимые случайные наклоны усредняются одинаковыми во всех масштабах. Это называется *статистическое самоподобие*, или независимость масштаба для усредненного поведения.

Наконец, когда седьмая итерация завершена (это был бы 15-й кадр на рис. 7-1, если бы фигуре разрешили зайти так далеко), назначается вся сетка 129×129 . На этом этапе, когда фрактальный алгоритм завершен, область напоминает круглую апертуру. Аберрации и передачи точек, находящихся дальше, чем в 64 точках от центральной точки, обнуляются, а если моделируется вторичная точка, то же самое делается для всех точек в пределах определенного радиуса. Внешние части сетки 129×129 обрезаются, как лишнее тесто корочки пирога. Затем рассчитывается статистика светосилы, и среднеквадратичное отклонение масштабируется до значения

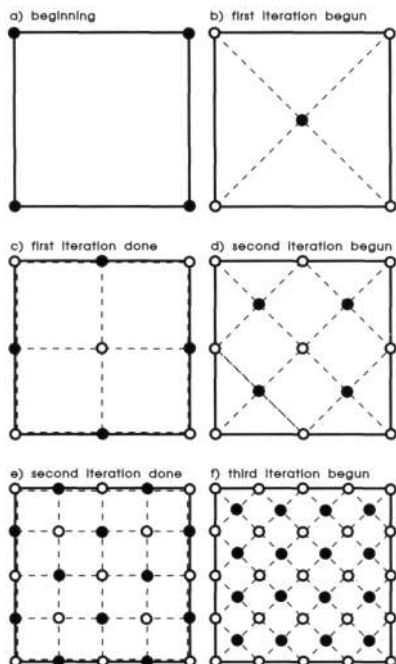


Рис. 7-1. The упорядочивание назначений точек алгоритма отклонения средней точки. Здесь шероховатость выходит за рамки бумаги.

требуемого индивидуальным расчетом.

Здесь может возникнуть легкое недопонимание рис. 7-1. Из-за его поверхностного сходства с более поздними кадрами изображения читатели могли ошибочно предположить, что эта нефизическая математическая процедура используется для расчета изображения. Этот метод просто моделирует функцию случайной абберации на *ученик*, не изображение. Изображение рассчитывается с использованием той же теории Гюйгенса-Френеля, которая использовалась в других главах (см. Приложение В).

Физические причины могут привести к тому, что случайные вариации не сохраняются одинаково во всех масштабах. На самом деле так обстоит дело и с турбулентностью. Характерный масштаб турбулентности, или расстояние между «выступами», составляет порядка 2-20 см, с хорошей однозначной оценкой 10 см (Родье 1981, стр. 302; Шредер 1987, стр. 314). Резких деформаций волнового фронта при небольших латеральных движениях не предвидится. Шероховатость волнового фронта слегка закруглена. Эта особенность приводит к хорошо известному эффекту «маленького телескопа», когда кажется, что крошечные инструменты дают лучшее изображение, чем большие. Апертуры размером менее 100 мм просматривают части волнового фронта, более близкие к плоскости. Турбулентность

заставляет изображение прыгать, но время от времени оно кажется четко очерченным.

По этой причине алгоритм немного модифицирован. *Агашающий фактор* применяется к 2 убываниям каждой $\sqrt{\text{полуитерации}}$. Делитель в этом случае становится $2d$, где d является закалочным фактором. Для d Если значение больше 1, поверхность смягчается, делая грубые изменения более заметными, при этом мелкомасштабная шероховатость относительно подавляется. Поверхность напоминает смятую гладкую бумагу, а не наждачную бумагу. Используемый здесь коэффициент гашения составлял от 1,1 до 1,6. Никаких попыток физически обосновать эту модель не предпринималось, но уменьшение вихрей более мелкого масштаба требует некоторого сглаживания. Изображения, созданные с помощью таких факторов гашения, выглядят наиболее достоверно, и этот реализм оправдывает их использование в изображениях, представленных здесь.¹ При коэффициентах закалки, отличных от 1, поверхность перестает быть самоподобной.

Другая модификация — это способ управления шероховатостью в наибольшем масштабе. Мы могли бы ожидать, что турбулентность проявит себя иначе в 24-дюймовом гиганте, чем в крошечном рефракторе. В больших телескопах изображение меньше прыгает, и мгновенное прояснение размытия происходит реже. Для целей этой главы наибольший масштаб шероховатости был установлен на значительной части апертуры. Таким образом, приведенные ниже расчеты подходят для небольших телескопов с апертурой около 200 мм для большинства случаев турбулентного воздуха.

Некоторые важные характеристики этой фрактальной аберрации повлияют на качество нашего моделирования. Во-первых, распределение по поверхности не является гауссовым (в форме колоколообразной кривой). Поверхностное распределение (показанное на рис. 7-2) является примерно гауссовым в том смысле, что оно более или менее пиковое, но ни при каких обстоятельствах оно не является гауссовым и никогда не будет гауссовским, даже если бы итерацию можно было продолжать бесконечно. Чаще всего в распределении поверхности обнаруживаются множественные пики. Такое необычное действие позволяет нам моделировать детали, которые были бы вымыты из гауссовских моделей.

Во-вторых, поверхность локально коррелирована. Поверхность с памятью позволит нашим изображениям содержать реалистичные полосы и неровности. Показанные ниже MTF рассчитаны с использованием смоделированных «моментальных» поверхностей и демонстрируют статистические вариации. Эта процедура дает нам важную картину, которую невозможно было бы получить, если бы мы рассчитывали MTF на основе средних значений длительного воздействия.

Одна особенность компрометирует описанный выше алгоритм. Предполагается, что вымышленные внешние точки равны нулю, поэтому можно ожидать появления некоторых необычных искажений вблизи краев. Поскольку поверхность была обрезана по кругу, наихудшие последствия наблюдаются в четырех направлениях компаса узора, ближайших к этим краям. Искажения действительно наблюдались, но проблемные области были небольшими, и эффекты не сразу проявлялись на дифракционных картинах.

¹ Читатели, интересующиеся более физически усредненными по времени моделями, могут найти обзор и хорошую библиографию в обзорной статье Хуфнагеля (1993).

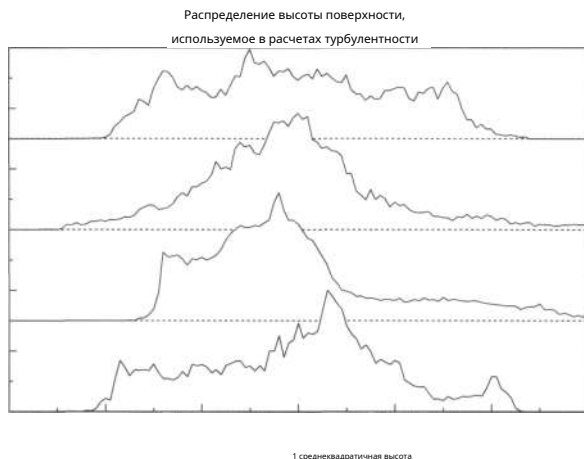


Рис. 7-2.Пример распределения турбулентных волновых фронтов по высоте, ось X измерена в единицах среднеквадратического значения шероховатости.

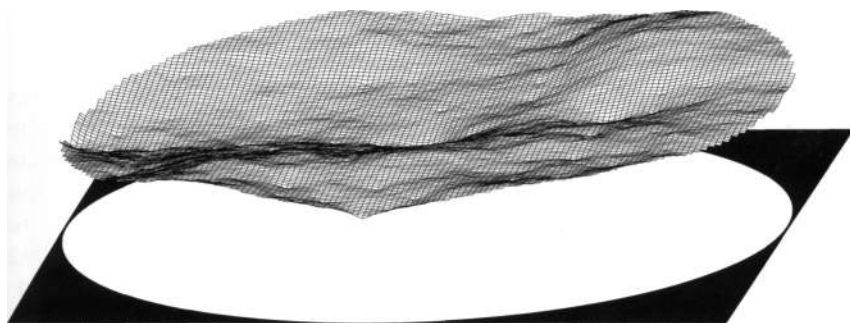


Рис. 7-3.Пример смоделированной абберационной функции турбулентности воздуха.

Пример турбулентного волнового фронта показан на рис. 7-3, при этом волновой фронт удобно поднимается на небольшое расстояние через апертуру. Самым приятным аспектом этого узора являются псевдослучайные складки, проходящие через него. Складки должны моделировать поведение теневых полос реальных турбулентных воздушных потоков, которые вызывают пятна и временные всплески на изображении. Фактор гашения сглаживает мелкомасштабные изменения, которые становятся более очевидными по сравнению с функцией абберации для первичной пульсации в главе о шероховатости. Поскольку более ранние итерации были способны на гораздо большее движение, в функции аббераций время от времени появляются ямки.

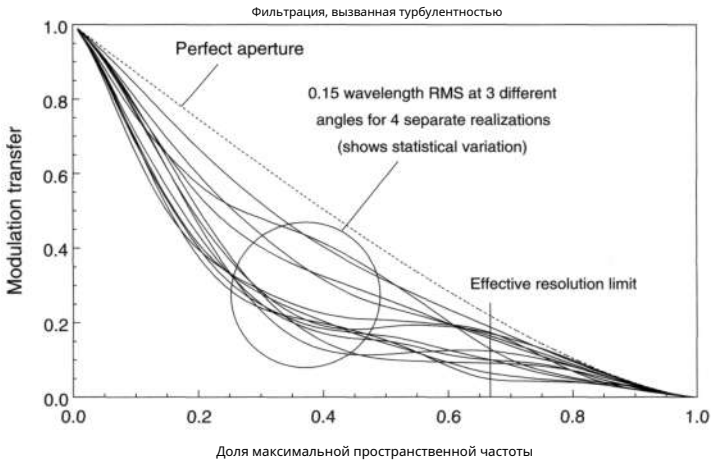


Рис. 7-4. Двенадцать кривых MTF, связанных со среднеквадратичным значением турбулентности воздуха на длине волны 0,15. Аберрационные функции рассчитываются с использованием фрактальной модели, описанной в тексте.

7.2.2 Фильтрация, вызванная турбулентностью

Эти отверстия не являются кругово-симметричными. Их способность сохранять контрастность зависит от ориентации полосок мишени MTF. Таким образом, MTF для каждой из четырех сгенерированных поверхностей рассчитывался по 3 осям. Все 12 таких кривых MTF показаны на рис. 7-4. Величина использованной среднеквадратичной аберрации была примерно в два раза больше $1/14$ -длина волны, допуск Марешаля. Если посмотреть на рис. 7-2 и заменить среднеквадратичную высоту на длину волны 0,15, то станет очевидно, что общая аберрация волнового фронта примерно в 4 раза превышает это значение, или 0,6 длины волны. Эта аберрация примерно в два раза серьезнее, чем можно допустить при наблюдениях с высоким разрешением, но такая аберрация ни в коем случае не является редкостью для турбулентности воздуха. Часто видеть гораздо хуже.

Также обратите внимание на сильные колебания в высокочастотном конце графика. Поскольку кривая здесь быстро колеблется, разрешение ограничено примерно от $1/2$ до $2/3$ теоретического максимума для апертуры. При апертуре 200 мм центральный круг размытия имеет радиус примерно от 1 до 1,5 угловых секунд.

7.2.3 Наблюдение турбулентности

На графиках сфокусированного изображения на рис. 7-5 смоделированная турбулентность соответствует 5 по шкале зрения Пикеринга 1-10, поскольку сфокусированный диск всегда виден, но дуги видны нечасто. Это число соответствует

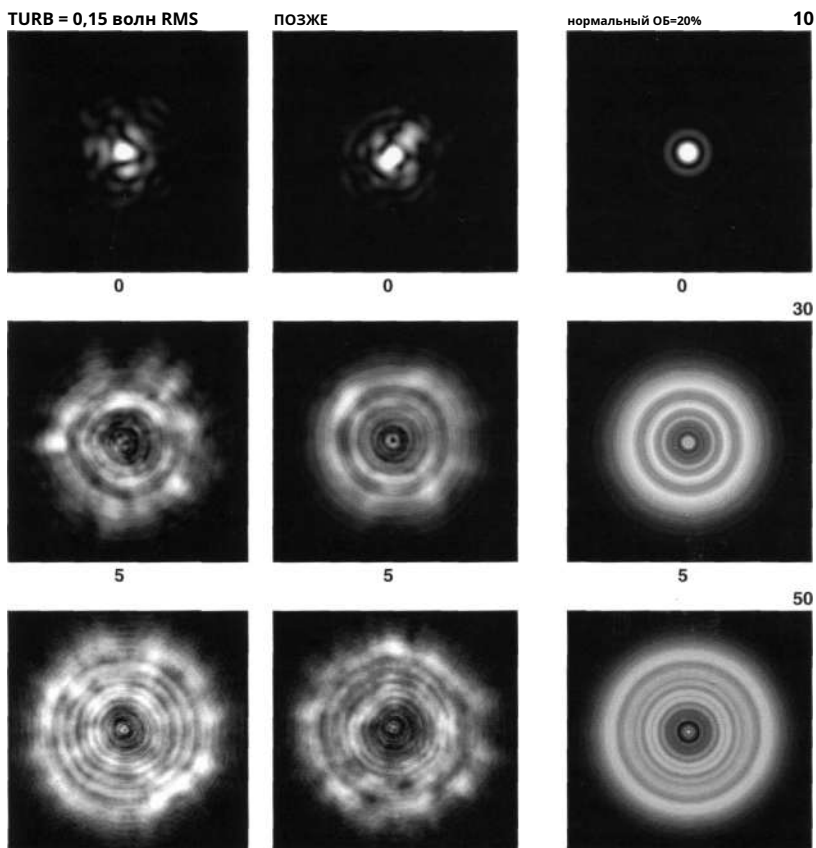


Рис. 7-5. Шаблоны изображений рассчитаны для турбулентности 0,15 длины волны. Идеальные узоры находятся справа. Центральное препятствие произвольно устанавливается на уровне 20% апертуры. (Описание маркировки фигурок изображений см. в Прил. Г.)

«плохой» рейтинг зрения (Muirden 1974). Иногда турбулентность бывает гораздо более серьезной. Хороший лунно-планетный обзор требует большего.

На рис. 7-6 прослеживается сфокусированное изображение по мере того, как турбулентная абберация становится менее нежелательной. На рис. 7-6а показаны длинные дуги, и рейтинг Пикеринга, вероятно, колеблется между 6 и низкими 7. На рис. 7-6б рейтинг высокий, 8, поскольку кольца целные, но всегда движутся. На рис. 7-6с речь идет о высоких 9 или низких 10, поскольку кольца неподвижны и диск четко выражен, но слабое кольцо все равно распадается. Столько, сколько/20 длина волны деформации волнового фронта турбулентности, видимость по-прежнему имеет рейтинг 10 из 10.

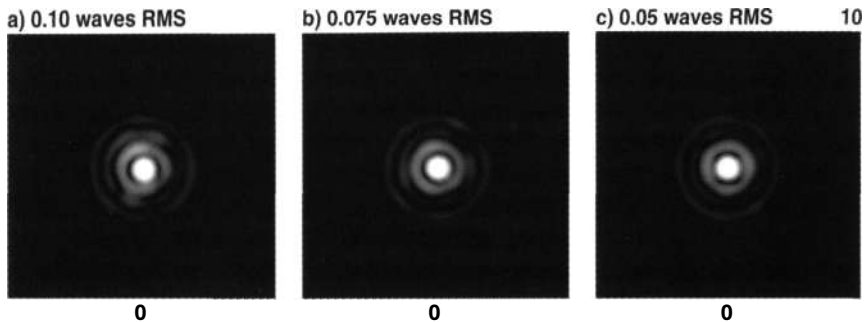


Рис. 7-6. Сфокусированные изображения, поскольку турбулентность уменьшается. Кольцевая структура появляется вновь..

Аберрацию турбулентности легко отличить от других аберраций:

1. Он движется быстро. Менее чем через секунду вы видите совершенно другую картину.
2. Он сбалансирован по обе стороны от фокуса (несбалансированные аберрации могут изменить структуру, но такое поведение не вызвано турбулентностью воздуха).
3. Если вытащить окуляр за пределы фокуса на бесконечность, часто можно сфокусироваться на самих возмущениях высоко в атмосфере. Они выглядят как полосы или ячейки, перемещающиеся по расфокусированному изображению.

7.2.4 Корректирующие действия

Вы мало что можете сделать с турбулентностью на большой высоте, поскольку она вне досягаемости. Высокая турбулентность — это скорее функция климата, а не местное явление. Тем не менее, вы можете запустить журнал погоды и просмотра условий и посмотреть, сможете ли вы найти корреляции. В общем, наличие облаков и сильный ветер указывают на то, что избыток энергии переносится в атмосфере и что зрение ухудшается. Хорошее зрение не всегда связано с прозрачными ночами и на самом деле может иметь отрицательную корреляцию. Спокойные ночи обычно бывают немного туманными.

Другое дело — локальное зрение или турбулентность, возникающая на расстоянии нескольких сотен футов от земли. Локальная турбулентность воздуха может быть вызвана тепловыми потоками от зданий или сооружений, которые еще не остыли от дневного отопления. Черепица для дома известна своим длительным временем остывания. Асфальтовое покрытие также сохраняет тепло и медленно его отдает. По этой причине наблюдение над травой или деревьями гораздо предпочтительнее, чем наблюдение над домами или дорогами.

Некоторые авторы отмечали интерференцию, вызванную наземным наблюдением (Muirden 1974), которая представляет собой эффект, локализующийся очень близко к телескопу.

Лично у меня никогда не возникало проблем с турбулентностью вблизи телескопа, которая не была вызвана установкой телескопа прямо на асфальт или бетон. Однако единственным исключением из этой общей ситуации является то, что ближайший наблюдатель представляет собой очень хорошую печь. Тепло тела может легко распространяться по открытой трубке. Летом эта проблема не так уж велика, когда перепады температур меньше, но зимой она может нанести серьезный вред изображению. Здесь часто помогает тканевая драпировка для каркаса из открытой трубы.

Когда несколько человек наблюдают вместе, следует следить за тем, чтобы те, кто ждет, чтобы посмотреть, не собирались вблизи оптического пути телескопа или с наветренной стороны от него. Нагретый воздух от их тел или дыхания может перехватить входящий луч света. Если возможно, при проведении сеанса публичного наблюдения расположите линию на стороне оптического пути, где дует ветер. Наконец, если вам нужно перевезти телескоп на место, обязательно припаркуйте автомобиль или грузовик так, чтобы воздух, поднимающийся из горячего двигателя, не мешал ожидаемым наблюдениям с высоким разрешением.

7.3 Трубные токи

На воздух разной температуры действует сила тяжести, поскольку более холодный воздух весит больше. Когда он не ограничен внешними структурами, он образует конвекционные ячейки, обсуждавшиеся выше. Воздух внутри наклонной трубы стремится следовать за стенкой: горячий воздух на верхней стороне, холодный воздух на нижней стороне. Трубка напоминает наклоненную дымовую трубу. Поскольку воздух нагревается внизу и становится менее плотным, холодный воздух падает вниз по трубке и выталкивает горячий воздух вверх. Он поднимается, охватывая трубку с верхней стороны, и в конечном итоге выходит наружу.

Если телескоп имеет температуру окружающей среды или близкую к ней, разница температур не настолько велика, чтобы вызвать токи в трубке. Однако, когда телескоп впервые выносят на улицу, тепловая инерция вызывает проблемы, пока инструмент не достигнет температуры окружающей среды. Толстое стекло объектива особенно склонно к медленному охлаждению.

7.3.1 Функция аберрации

Очевидно, что каждый телескоп охлаждается по-разному. У некоторых есть другие проблемы, которые могут скрыть или изменить токи трубки, например, горячий монтаж или наблюдательная площадка, которая сохраняет тепло со дня. Некоторые из них имеют трубки необычной формы или частичные трубки, которые могут изменить модели, смоделированные здесь. Все охлаждающие телескопы имеют неизбежную локальную турбулентность. Некоторые телескопы имеют только короткие зеркальные коробки и не имеют настоящих трубок, и они создают другие узоры, чем показано ниже.

Шмидта-Кассегрена и рефракторы должны охлаждаться только через задние выходные отверстия или непосредственно через трубку путем радиации и кондукции.

охлаждение. У одного глаза Шмидта-Кассегрена, который я исследовал, вторичная тень расширялась с одной стороны фокуса и тянулась параллельно краю вторичной тени с другой. Сначала я подумал, что у него треснута корректирующая пластина возле вторичного монтажного отверстия, но когда ориентация трубки менялась, узор всегда следовал вверх-вниз. Предположительно, большая часть охлаждения происходила внутри или вокруг перфораций зеркала или пластины корректора. Неравномерное тепловое воздействие перегородки Кассегрена также могло стать причиной проблемы.

Несмотря на то, что такое поведение наблюдается не в каждом телескопе, поведение, смоделированное ниже, достаточно распространено у ньютоновцев малого и среднего размера с круглыми трубками. Модель предполагает, что теплый воздух ограничен верхней стороной трубки и что его эффект заключается в продвижении волнового фронта только вдоль этой верхней стороны, оставляя остальную часть оптического пути сравнительно нетронутой. В главе 2 такое поведение было описано как напоминающее переворачивание страницы.

Используемая здесь модель

$$\begin{aligned} V_{\text{Трубка}}(Икс) &= \frac{A_{\text{Трубка}}(Икс-0,3)z}{(0,7)z} & (Икс > 0,3) \\ V_{\text{Трубка}}(Икс) &= 0 & (Икс \leq 0,3) \end{aligned} \tag{7.1}$$

где $Икс$ — линейная координата в одном направлении по поверхности с началом координат в центре апертуры. Значение $Икс$ достигает 1 на краю апертуры.

Модель не допускает изменений в каком-либо другом направлении, кроме координаты вверх-вниз. Никакая шероховатость не накладывается на влияние тока трубки, хотя она наверняка присутствует.

Аберрация, нанесенная на зрачок, показана на рис. 7-7, направлением вверх вправо.

7.3.2 Фильтрация ламповых токов

Опять же, значение передаточной функции модуляции зависит от ориентации стержня. Функция рассчитывалась для трех углов: вверх-вниз, влево-вправо и наклона на 45° . На рис. 7-8 показаны два случая. Пример с длиной волны $\lambda/2$ настолько плох, насколько наблюдатель должен терпеть. Случай с λ длиной волны является серьезным, но не необычным для телескопов, которые только что были перенесены из теплого окружения.

Этот график передаточной функции обладает рядом интересных особенностей. Во-первых, это внезапное падение как 45° , так и горизонтального MTF. Резкое падение вызвано локализованным характером аберрации. Крутой наклон аберрации выбрасывает много света из дифракционного пятна, влияя даже на пространственные частоты $\lambda/10$ от максимума. Например,

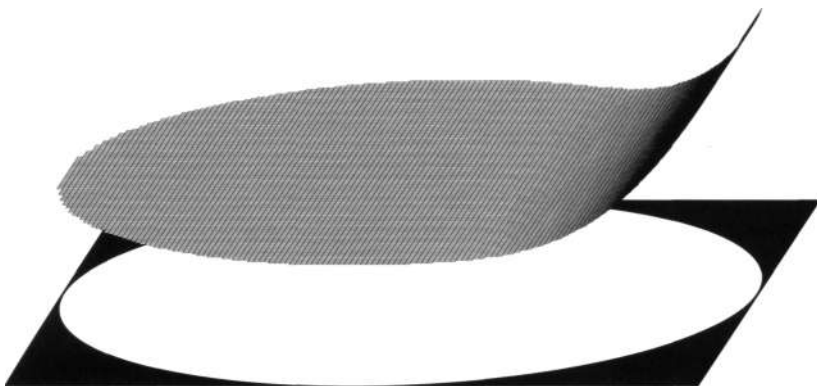


Рис. 7-7. Функция aberrации тока трубки, смоделированная по апертурному зрачку.

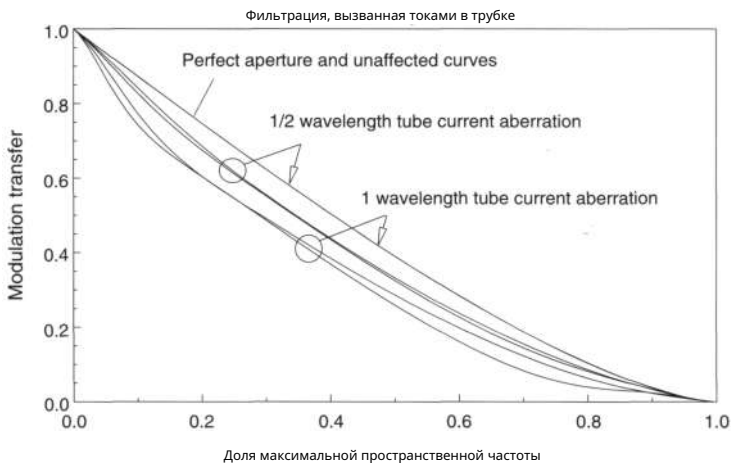


Рис. 7-8. MTF для смоделированной aberrации тока лампы. Показаны две разные aberrации. Каждая aberrация имеет три кривые, но ориентация полосы вверх-вниз не приводит к ухудшению качества. Восходящие MTF обоих значений aberrации являются нанесенные одинаково поверх идеального узора.

если бы у вас была апертура 200 мм, разрешение деталей в 5 угловых секунд было бы заметно ухудшено.

Во-вторых, для одной кривой каждой величины aberrации контраст не изменяется. Размытие изображения по вертикали не влияет на разрешение целей MTF с полосами, ориентированными вверх-вниз. Конечно, немоделированная шероховатость немного нарушит эту симметрию.

7.3.3 Наблюдение токов в трубке

Токи в трубке легко увидеть. Проблема заключается в том, чтобы определить, действительно ли аберрация вызвана током трубки или присутствует в стекле. Эти токи могут быть удивительно стабильными. Можно подумать, что они будут танцевать и покачиваться, как высотная турбулентность. Паттерны меняются, но медленно, как пламя свечи. Даже если интеллектуально вы знаете, что свеча — это динамический процесс, когда вы смотрите на огонь, вы легко переходите в удобную точку зрения, что он неподвижен. Кажется, что пламя свечи возвышается над фитилем.

По-настоящему горячие телескопы кипят от турбулентности, но они не проявляют этот эффект очень долго. По мере охлаждения телескопа крошечные перепады температур не способствуют образованию массивных турбулентных воздушных масс. Воздух медленно и плавно движется вверх. Он вяло дрейфует из стороны в сторону, но в любой момент времени относительно тих. На токи в трубках всегда влияет сила тяжести, поэтому они ориентированы вверх-вниз.

Вы можете легко определить ориентацию предполагаемой деформации волнового фронта тока трубки для рефракторов и инструментов типа Кассегрена, просто не используйте прямоугольный изгиб оптического пути. Однако для ньютоновского рефлектора определить угол изображения непросто. Причина, конечно же, во встроеном диагональном отражении.

Предлагаются два средства правовой защиты. Первый — использовать звезду на меридиане север-юг. Направление можно определить по западному дрейфу, отключив часовой привод (если он используется). Этот трюк нельзя использовать для проверки искусственного источника. Для такого телескопа простой способ — вывести окуляр далеко за пределы фокуса, а затем вставить кулак или другое препятствие под известным углом перед апертурой. Тогда можно будет легко найти верх или низ.

Дифрактограмма, рассчитанная для суммарной аберрации в 1 длину волны, представлена на рис. 7-9. Узор сжимается с одной стороны фокуса и вытягивается с другой.

Как только вы увидите ток в трубке, убедитесь, что проблема не в какой-то другой проблеме. Сначала измените ориентацию трубки. Найдите элемент трубки, вдоль которого направлено растяжение. Если ориентира на трубке нет, сделайте небольшую отметку на трубке или прикрепите небольшой моток ленты. Затем поверните трубку на разумный угол. К сожалению, вилки Шмидта-Кассегрена невозможно вращать. Используйте тестовый источник в другом месте.

Токи трубки по-прежнему будут направлены вверх и вниз в новой ориентации, но они растягиваются в сторону другого элемента трубки. Другие трудности, такие как искривление или повреждение оптики, теперь проявляются в невертикальном наклоне окуляра.

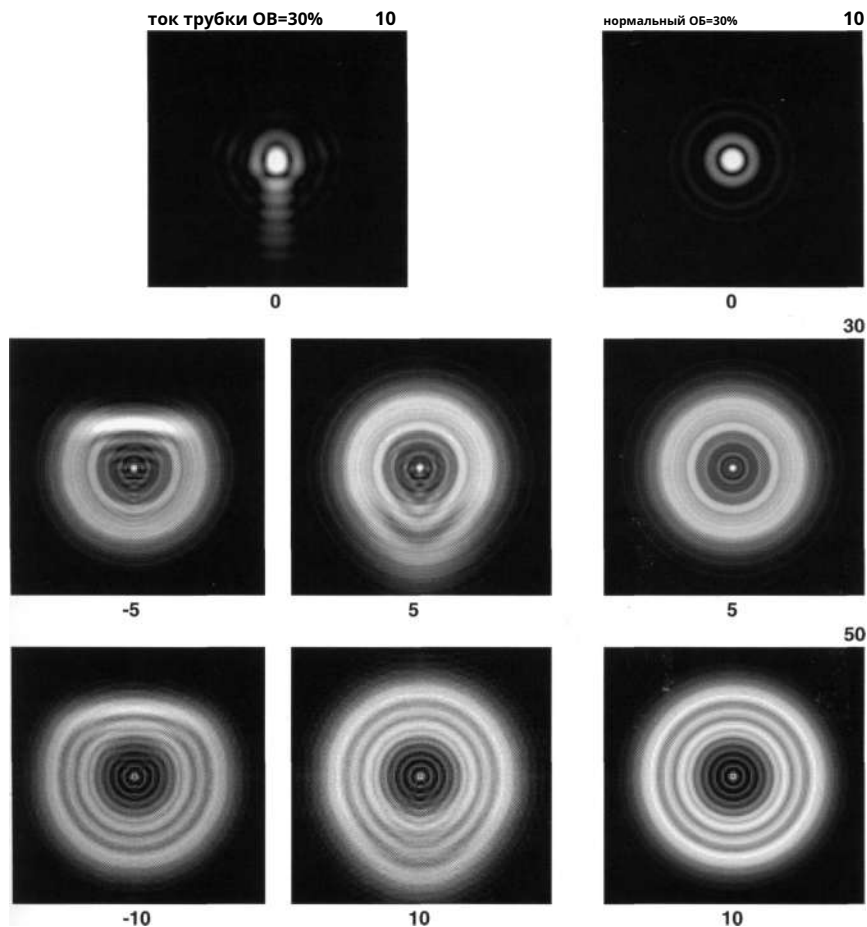


Рис. 7-9. Звездчатые тестовые шаблоны с абберацией тока трубки на 1 длину волны. Идеальная диафрагма указана в столбце справа.)

7.3.4 Корректирующие действия для токов трубки

Токи в трубке на самом деле не так уж опасны для очень маленьких телескопов. Просто подождите, пока телескоп остынет до температуры окружающей среды. Если температура окружающей среды меняется настолько сильно, что телескоп никогда не догоняет местную температуру, атмосферные условия настолько нестабильны, что видимость в любом случае будет плохой.

Герметичные телескопы, особенно рефракторы, не проявляют тех же эффектов тока в трубке, которые характерны для рефлекторов с открытой трубкой. Рефракторы обычно изготавливаются из металлических трубок, которые легко отводят тепло, поэтому быстро охлаждаются.

Глава 5

Проведение звездного теста

Астрономы уже давно используют звездное испытание как утешительное прикосновение к реальности. Часто бывает достаточно быстрого поворота фокусера, чтобы убедиться, что телескоп выровнен, остыл и готов к работе. Для такого определения не требуется обращаться к цифрам, но иногда вам может понадобиться использовать звездный тест, чтобы оценить силу аберраций на стекле. Затем вы должны точно знать, насколько далеко нужно расфокусировать телескоп, исходя из величин, которые можно сравнить с деформациями волнового фронта.

Кроме того, удобное использование звездного теста зачастую не имеет ничего общего со «звездами». В некоторых случаях атмосферная турбулентность, видимое движение звезд или ожидание ясной ночи делают использование настоящих звезд слишком трудным. Для проведения дневных или наземных испытаний вы больше не можете полагаться на большие расстояния и малую угловую протяженность реальных звезд. При использовании искусственного источника вы должны рассчитать минимальное расстояние, на котором его можно разместить, и максимальный размер отверстия. Если вы небрежно относитесь к этим пунктам, вы можете несправедливо решить, что хороший телескоп — это плохо.

В этой главе в первую очередь рассматриваются следующие три темы:

1. Переводим дефокусирующую аберрацию на более знакомую, но менее общую тему движения окуляра.
2. Определение размеров, изготовление и размещение искусственных источников.
3. Настройка и проведение «официального» звездного теста, а не обычной проверки условий работы телескопа.

Важные результаты этой главы приведены в таблицах. Для полноты вывода схематически представлены здесь или в Приложении. Те, кто интересуется, могут увидеть, откуда возникли некоторые концепции в этой главе, но для проведения эффективного звездного теста требуется не более чем осторожное использование **СТОЛЫ**.

5.1 Расфокусировка и чувствительность

Рисунки, представленные в этой книге, не содержат каких-либо упоминаний о том, насколько далеко вам нужно повернуть фокусер вперед или назад, чтобы получить определенную степень расфокусировки. Вместо этого любая величина расфокусировки относится к *дефокусирующая aberrация* измеряется в длинах волн на апертурном зрачке (см. конец главы 4). Зачем использовать расфокусировку таким своеобразным образом, если простой метод движения окуляра понятен каждому?

Ответ прост; Телескопы слишком отличаются друг от друга. Точное расстояние, на которое должен переместиться фокусер, чтобы показать заданную картину, зависит от фокусного отношения телескопа. Телескопы с одинаковыми aberrациями и препятствиями покажут одинаковые закономерности, но все они будут показывать одинаковые движения окуляра. Если вы задаете движение фокусера, вы также должны указать фокусное расстояние. В результате получается мутная картина действительно простой концепции.

Дефокусирующая aberrация, измеренная на волновом фронте, представляет собой своего рода универсальную систему координат, которая классифицирует одинаковое поведение во многих разных телескопах. Чтобы уменьшить множественность паттернов, в качестве общей переменной используется aberrация дефокусировки. Он имеет функции, выходящие за рамки типов телескопов. Что еще более важно, легко пойти другим путем и рассчитать, насколько далеко вам нужно переместить окуляр, чтобы получить заданную aberrацию расфокусировки.

5.1.1 Движение фокусера, связанное с aberrацией дефокусировки

Об aberrации дефокусировки было кратко упомянуто в конце главы 4, но никаких выводов из нее сделано не было. Это простое выражение, которое описывает различия в *сагиттах* двух разных сфер волнового фронта. Разница между двумя положениями окуляра для заданного числа длин волн aberrации дефокусировки получена в Приложении E. Результат:

$$ff' = \Delta f = 8F_2 \Delta n \lambda, \quad (5.1)$$

где Φ — коэффициент фокусировки, λ — длина волны, $\Delta \eta$ — изменение aberrации дефокусировки на длинах волн.

Если разрешено идти от $+1/8$ до $-1/4$ эта величина становится $\Delta \eta = 4\lambda F_2$. Это выражение для *глубина фокуса*, или максимальную дальность при неправильной настройке фокусера. Поскольку диаметр дифракционного изображения составляет $2,44\lambda F$, длина пятна изображения намного превышает ширину. Действительно, соотношение длины и ширины

$$\frac{\text{длина}}{\text{ширина}} = \frac{4\Phi_2 \lambda}{2,44\lambda F} = 1,64\Phi \quad (5.2)$$

¹The *стрелец* — это величина, на которую сфера выступает через отверстие. Поскольку радиусы краев этой частичной сферы выглядят как натянутые тетивы, естественно было назвать эту величину *сагитта*, или *стрелка*. (См. рисунок в Приложении E.)

составляет почти 25 для инструмента с диафрагмой $f/15$.

Длина этой области в форме колбаски очень полезна. Это допускает небольшие ошибки при настройке фокуса вспомогательных инструментов (например, фотоаппаратов). Это имеет меньшее значение при настройке зрительного фокуса, поскольку фокус обычно настраивается самим глазом. Только те наблюдатели, которые перенесли операцию по удалению катаракты или у которых недостаточна гибкость глаз, могут быть вынуждены полагаться исключительно на фокусирующее действие телескопа.

Сиджвик дал еще одну формулу глубины резкости: $\Delta \cdot \lambda' = 4(1,22\lambda\Phi_2)$. Этот коэффициент в 1,22 больше, чем полученный здесь (Sidgwick 1955, стр. 425). Кажущееся несоответствие связано с методами, использованными для вывода выражений. Ни одна из формул не является четким пределом, а лишь точкой, в которой изображение начинает заметно ухудшаться. Оба выражения пропорциональны квадрату фокусного расстояния. Таким образом, телескоп с диафрагмой $f/5$ имеет лишь четверть допуска фокусировки телескопа с диафрагмой $f/10$.

В таблицах 5-1а и 5-1b перечислены движения окуляра при различных фокусных расстояниях и абберациях дефокусировки. Например, если мы расфокусируем изображение ньютоновского объектива с диафрагмой $f/6$ на 8 длин волн, из таблиц видно, что нам необходимо изменить фокус на 0,050 дюйма (или 1,27 мм). В принятом здесь соглашении необходимо сосредоточить внимание *наружу* когда абберация дефокусировки задается положительным числом, а *фокус внутрь* если абберация расфокусировки задана как отрицательная.

Многое можно узнать, внимательно изучив эти таблицы. Они показывают, что расстояния дефокусировки исчезающе малы для быстрых фокусных чисел. В первом столбце таблицы указана абберация дефокусировки, составляющая 0,5 длины волны, или глубина фокуса, упомянутая выше. Однако для достижения фокусировки в пределах $\pm 1/4$ длины волны при $f/4$ (или $\Delta H' = 0,5$), необходимо удерживать фокус с точностью до 0,0014 дюйма или 0,035 мм. Очевидно, что если бы наши глаза не имели возможности внутренней регулировки, нам было бы сложно фокусировать быстрые инструменты. Спиральные или моторизованные фокусеры с замедленным движением кажутся оправданными для этих телескопов с низким фокусным соотношением.

На другом конце таблицы находятся чрезвычайно длинные фокусные расстояния, такие как $f/22$, которые характеризуют двухзеркальные шифспиглеры Kutter. Чтобы вызвать в таких инструментах дефокусирующую абберацию на 12 длин волн, нам пришлось бы переместить окуляр более чем на дюйм. Очевидно, что на таких медленных инструментах мы будем внимательно изучать лишь небольшие абберации дефокусировки, прежде чем закончится ход фокусера. Однако длиннофокусные телескопы обычно представляют собой лунно-планетные инструменты. Они намеренно тестируются по более высоким стандартам, поэтому наиболее интересны небольшие степени расфокусировки. Коэффициент фокусировки 50 включен, потому что вы можете замаскировать свой инструмент, чтобы увидеть предположительно идеальное изображение.

На быстрых инструментах изображение звездного теста, вероятно, будет оцениваться при высоких значениях расфокусировки, даже превышающих 12 длин волн. Это не такая уж большая проблема, поскольку тест по-прежнему чувствителен к относительно тяжелым воздействиям.

Таблица 5-1а
 Расстояние дефокусировки для разных фокусных соотношений и aberrации дефокусировки (расстояния в дюймах)

Длина волны 2,165 x 10.⁻⁵v

Фокальное соотношение	Дефокусирующая aberrация (длины волн)				
	0,5	1	4	8	12
4	0,0014	0,0028	0,011	0,022	0,033
4,5	0,0018	0,0035	0,014	0,028	0,042
5	0,0022	0,0043	0,017	0,035	0,052
6	0,0031	0,0062	0,025	0,050	0,075
7	0,0042	0,0085	0,034	0,068	0,102
8	0,0055	0,011	0,044	0,089	0,133
9	0,014	0,056	0,112	0,168	0,0087
10	0,069	0,139	0,208	0,010	0,021
11	0,168	0,25	2	0,012	0,025
12	0,299	0,019	0,039	0,156	0,312
15	0,042	0,084	0,335	0,671	1,006
22	0,433	1,732	3,465	5,197	
50					

Таблица 5-1б
 Расстояние дефокусировки для разных фокусных соотношений и aberrации дефокусировки (расстояния в миллиметрах)

Длина волны 550 нм

Фокальное соотношение	Дефокусирующая aberrация (длины волн)				
	0,5	1	4	8	12
4	0,035	0,070	0,282	0,563	0,845
4,5	0,045	0,089	0,356	0,713	0,055
5	0,440	0,880	0,079	0,158	0,634
6	0,108	0,216	0,862	1,725	0,141
7	1,126	2,253	0,178	0,356	1,426
8	0,220	0,440	1,760	3,520	0,266
9	2,130	4,259	0,317	0,634	2,534
10	0,495	0,990	3,960	7,920	11,8
11	2,130	8,518	17,037	25,555	6,389
12					7,603
15					
22					
50	5.500	11.000	44.000	88.000	132.000

aberrации, которые беспокоят эти инструменты.

Лучший способ использовать таблицы 5-1а и 5-1б — найти значения, соответствующие вашему фокусному соотношению, и записать их где-нибудь. Возможно, будет даже удобно откалибровать ручку фокусировки. Сделайте полный оборот и посмотрите, насколько это сдвинет фокус. Эта процедура проста для ньютоновцев и рефракторов. Вы просто измеряете изменение величины выступа трубки фокусера. Например, если один поворот ручки дает $\frac{1}{4}$ дюйма (19,05 мм) хода фокусера, поворот на 30° дает примерно $\frac{1}{16}$ дюйма (1,6 мм).

Это движение эквивалентно абберации дефокусировки на 10 длин волн для телескопа, работающего при диафрагме $f/6$.

В катадиоптрике типа Кассегрена менее очевидно, как определить, в каком направлении отслеживается фокус или как далеко он перемещается. Эти инструменты обычно достигают фокусировки не за счет физического перемещения окуляра, а за счет внутреннего перемещения главного зеркала к вторичному. Сначала сфокусируйте телескоп, надежно удерживая окуляр в гнезде. Затем ослабьте окуляр и вытяните его примерно на 10 мм за пределы гнезда. Теперь затяните установочный винт. Найдите фокус еще раз, осознавая направление и угол, на который вы повернули ручку фокусировки (это может помочь, приклеив временный указатель на конец ручки). Вы нашли направление и величину эффективных 10 мм. *внутри* смена фокуса. На моем Шмидте-Кассегрене это движение было против часовой стрелки.

5.1.2 Чувствительность звездного теста

В уравнениях, управляющих дифракцией (Приложение Б), к суммированию добавляется дефокусировка как равномерно интерферирующий член. Точка, где ошибки проявляются с наибольшей чувствительностью, находится прямо в фокусе, поскольку не было добавлено никакого фактора дефокусировки, разбавляющего изображение. Однако у сфокусированного изображения есть две проблемы:

1. Вы не можете сказать, где именно возникла ошибка.
2. Способ выражения ошибки заключается в *интенсивности* дифракционных колец.

Хорошим примером является ухудшение качества изображения, вызванное вторичным зеркалом. Свет был выброшен из центра сфокусированного изображения на кольца, но вы не можете сказать, почему, всматриваясь в сфокусированное изображение. Более того, человеческий глаз не способен определять абсолютную интенсивность колец. Однако, немного расфокусировав окуляр, вы увидите, как начинают проявляться тени от диагонали. Тень более или менее следует своему происхождению, и абберации ведут себя аналогичным образом. Когда вы расфокусируете инструмент, свет частично перемешается, и вы сможете, по крайней мере, догадаться, в чем причина проблемы.

К сожалению, если вы расфокусируете любое изображение достаточно далеко, оно будет выглядеть одинаково, независимо от степени ошибки — плоский однородный диск света с четко очерченными препятствиями. Даже паук покажет себя, если слишком сильно расфокусироваться. Звездный тест теряет чувствительность при увеличении расфокусировки. Свет становится совершенно несмешанным.

Наша цель — найти промежуточный фокус, где свет стал немного менее запутанным, но все еще достаточно смешанным, чтобы проявлять оптические ошибки.

По моему мнению, большинство оптических ошибок лучше всего проявляются при аберрациях дефокусировки менее 8–12 длин волн (заметным исключением является наличие зон, которые часто лучше всего видны при дальнейшей дефокусировке).

Каков верхний предел чувствительности в идеальных условиях? Фотография на рис. 1-5 изображает реальную расфокусированную дифракционную картину почти идеальной круглой апертуры. В теоретической схеме, показанной на рис. 1-4, дефокусировка корректировалась до тех пор, пока теория не стала точно соответствовать фотографии. Вариации только $1/50$ длины волны было достаточно, чтобы уничтожить спичку. Даже в этом случае на фотографии видны небольшие различия, вызванные микроскопическими выступами на краю диафрагмы, сделанной из перфорированного металла. В лабораторных условиях, используя монохроматический свет, звездный тест может обнаружить искажения волнового фронта $1/50$ длины волны от пика до минимума, чрезвычайно чувствительный показатель.

Уэлфорд (1960) заявил, что звездный тест был точен до $1/20$ длины волны для широких деформаций волнового фронта и $1/60$ длина волны для резких изменений. Оценка Уэлфорда соответствует приведенным здесь наблюдениям. Далее, в главе 11 о зональных дефектах, отмечается, что звездный тест чувствителен к резким зонам даже при наличии сильной дефокусировки. И снова наблюдение согласуется с результатом Уэлфорда.

Полевые условия значительно уменьшат эту чувствительность. Несмотря на это, звездный тест более чем достаточен. При использовании света более одного цвета и тестировании в условиях, далеких от оптимальных, небольшая сферическая аберрация телескопов с общей ошибкой волнового фронта менее $1/10$ по-прежнему довольно легко обнаружить.

5.2 Искусственные источники

Звездный тест часто проводят в полевых условиях на настоящей звезде. Однако при критическом тестировании вы обнаружите, что искусственный источник света удобен и менее изменчив. Искусственные источники предпочтительнее по ряду причин:

1. Вы можете в некоторой степени контролировать яркость.
2. При наличии ярких источников цвет можно легко изменить и отрегулировать с помощью фильтров.
3. Близкий характер испытания позволяет меньше вмешиваться в турбулентную атмосферу.
4. Поскольку источник фиксирован относительно телескопа, его слежение не требуется. При необходимости вы можете жестко зафиксировать телескоп.

Красивый устойчивый рисунок, возникающий в результате использования искусственного источника, вас испортит. Однако есть некоторые недостатки:

1. Использование искусственной звезды обычно требует почти горизонтального положения телескопа. Это предъявляет максимальные требования к оптическим монтажным элементам. Необычный астигматизм, смещение или деформация могут быть обусловлены исключительно вертикальным положением кюветы.
2. Некоторые из рекомендуемых расстояний размещения источников, перечисленных в Таблице 5-2, требуют, чтобы вы просматривали горизонтальные промежутки в 1600 футов (около 0,5 км), хотя большинство значений в таблице намного меньше.
3. Вам нужно сделать точечный источник света. Вы должны знать диаметр точечного отверстия, чтобы убедиться, что он меньше разрешения вашего прибора. В отличие от настоящих звезд, источник не всегда гарантированно мал.

5.2.1 Расстояние до искусственных источников

Параболоидный отражатель — идеальное одиночное зеркало для света, исходящего на астрономических расстояниях. Однако, если источник находится на расстоянии всего в два раза большего фокусного расстояния, идеальной поверхностью будет сфера. На промежуточном расстоянии идеальное зеркало представляет собой вытянутый сфероид. Таким образом, три разные формы обеспечивают наилучшую визуализацию на трех разных расстояниях. Телескоп мог бы работать адекватно при тестировании звезды с ближайшим источником, но не работать, когда он направлен на далекое небо. Хуже того, хороший телескоп может быть несправедливо ошибочно оценен, если он не пройдет тест на источнике, расположенном слишком близко. Насколько сильно повлияет испытание, если источник будет расположен рядом?

Наибольший эффект от использования искусственного источника под рукой заключается в возникновении сферической абберации в системе. Другими словами, когда идеальный парабоид вынужден близоруко всматриваться в ближайший источник, он демонстрирует сферическую сверхкоррекцию, которая не наблюдается при направлении в небо. У.Т. Уэлфорд говорит, что звездный тест следует проводить с искусственной звездой, расположенной на расстоянии более 20 фокусных расстояний, но он также предупреждает своих читателей, чтобы они проводили точную трассировку лучей оптической системы, прежде чем ее использовать на сомнительно близких расстояниях от источника (Welford 1987). Ниже мы видим, что предложение Уэлфорда о 20-кратном увеличении фокусного расстояния является очень хорошим для нормальных апертур и фокусных отношений, но оно совершенно не работает для светосильных зеркал.

В мае 1991 года в номере *Небо и телескоп*, Роджер Синнотт проследил лучи через парабоидные зеркала и увидел, насколько близко можно расположить источник, прежде чем была замечена неприемлемая сферическая сверхкоррекция. Эта эмпирически выведенная формула, переписанная для используемых здесь обозначений, имеет вид

$$H[\text{футов}] = \left[\frac{D}{28} \right]^2 [D \text{ в дюймах}] \quad (5.3)$$

где F это фокусное соотношение и D диаметр отверстия. Это уравнение переписано для расчета множителя фокусного расстояния:

$$\text{Мультипл.} = \left(\frac{336}{F D} \right) \left(\frac{D}{F} \right)^2 = 336 \frac{D}{F^3} \quad [D \text{ в дюймах}] \quad (5.4)$$

Формулу можно перевести в любую систему единиц, убрав единицу длины волны:

$$\text{Мультипл.} = 336 (217 \times 10^{-5}) \frac{D}{F^3 \lambda} = \frac{1 D}{137 F^3 \lambda} \quad (5.5)$$

Сравнивая параболу и эллипс, которые касаются в центре и соприкасаются на краю зеркала, и удваивая наибольшую разницу, можно получить аналогичный результат аналитически. В результате получается немного другая формула

$$\text{Мультипл.} = \frac{1 D}{128 F^3 \lambda} \quad (5.6)$$

Разница незначительна и, вероятно, связана с тем, что программа Синнотта автоматически учитывает разный угол выхода с поверхности зеркала, тогда как аналитический расчет этот угол игнорирует. В Таблице 5-2 использован результат Синнотта, поскольку он приводит к меньшему расстоянию. Несмотря на то, что он получен численно, он, вероятно, более точен для низких фокусных соотношений, представляющих наибольший интерес. Пример расчета: 6-дюймовый параболаид $f/4$ имеет $1/4$ длины волны сферической гиперкоррекции при направлении на источник, расположенный на расстоянии 63 футов (кратное фокусному расстоянию: 31,5). Расстояния в этой таблице индуцируют приблизительно $1/4$ длины волны сферической аберрации в ньютоновском отражателе (Синнотт, 1991).

Поскольку расстояния, указанные в этой таблице, находятся лишь на грани оптической достоверности, читателям рекомендуется *двойной* для использования в звездном тесте. Длина волны входит в знаменатель уравнений 5.5 или 5.6, что означает, что идеальное зеркало будет выглядеть меньше, чем $1/8$ длина волны перекорректирована при расположении источника на таком расстоянии.

Не волнуйтесь, если вам придется расположить источник на несколько шагов ближе, чем хотелось бы. За годы моего опыта испытаний телескопов немногие инструменты обладали менее $1/8$ длина волны общей ошибкой на волновом фронте. (К сожалению, почти то же самое можно сказать и о $1/4$ длины волны.)

Расстояния, превышающие эмпирическое правило Уэлфорда, имеют место только при низких фокусных расстояниях или больших апертурах. Большинство сложных оптических систем, таких как рефракторы, изготавливаются в более медленных конфигурациях. Двадцатикратное фокусное расстояние, вероятно, позволит адекватно протестировать эти системы. Действительно, телескоп с наибольшей вероятностью нарушения правила Уэлфорда, вероятно, будет ньютоновским рефлектором, для которого рассчитана эта таблица.

Таблица 5-2
 Расстояния от телескопа до обскуры, приводящие к ошибке
 сверхкоррекции длины волны $\lambda/4$ в парабоидах
 (кратно фокусному расстоянию)

Д (дюйм)	Д (мм)	Фокальное соотношение					
		4	5	6	8	10	15
2,4	61	13	10*	10*	10*	10*	10*
3	76	16	10*	10*	10*	10*	10*
4,25	108	22	11	10*	10*	10*	10*
6	152	32	16	10*	10*	10*	10*
8	203	42	22	12	10*	10*	10*
10	254	53	27	16	10*	10*	10*
12,5	318	66	34	19	10*	10*	10*
14	356	74	38	22	10*	10*	10*
16	406	84	43	25	11	10*	10*
17,5	445	92	47	27	11	10*	10*
20	508	105	54	31	13	10*	10*
24	610	126	65	37	16	10*	10*

Значения, которые будут меньше фокусного расстояния более чем в 20 раз (после удвоения), в таблице не показаны и отмечены звездочками. Столь близкое расстояние от источника растянет фокус наружу более чем на $1/20$ нормального фокусного расстояния инструмента. Поскольку трубка фокусера редко допускает такие движения без выхода за пределы хода или серьезного виньетирования телескопа, такие близкие расстояния от источника не рекомендуются, если их можно избежать.

Фактически, перед тестированием рекомендуется снимать окуляр после фокусировки на искусственный источник. Наведите глаз на приблизительную фокальную плоскость и убедитесь, что вся оптическая система все еще находится в поле зрения (возможно, вам придется использовать фонарик, чтобы осветить внутреннюю часть трубки). Если нет, вам придется переместить источник дальше и повторить попытку.

В этой таблице встречается одна проблемная зона. В быстрых и чрезвычайно больших зеркалах допустимое расстояние резко увеличивается. Для 24-дюймового зеркала с диафрагмой $f/4$ источник следует разместить (после удвоения) на расстоянии не менее 2016 футов (0,61 км). Эти огромные инструменты сравнительно редки, и, что более важно, их редко проверяют на качество, выходящее далеко за пределы дифракционного предела. Большие телескопы используются для сбора света, поэтому использование $1/4$ длины волны в таблице 5-2, удвоенные, лучше, чем вообще не проводить тест.

Если вы тестируете более обычные инструменты, легко достигается удвоенное расстояние, указанное в таблице. Для более распространенного 12,5-дюймового объектива с диафрагмой $f/5$ исходное расстояние сократилось до приемлемых 354 футов (0,11 км).

Несмотря на то, что таблица 5-2 строго применима только к ньютоновским рефлекторам, мы будем использовать ее как общее руководство для звездного теста. Эти расстояния, я полагаю, будут примерно справедливы для фиксированных оптических систем в целом.

К сожалению, эта таблица не работает там, где сам механизм фокусировки телескопа нарушает оптическую коррекцию. Эта ситуация характерна для телескопов Шмидта-Кассегрена, которые меняют разделение зеркала и вторичного зеркала для достижения фокусировки. К счастью, разделение источников, которое приводит к отклонению лучей за пределы диска Эйри, было оценено Руттенем и ван Венроой. Для объектива 200 мм (8 дюймов) $f/10$, форма поверхности которого приближается к той, что имеется в коммерческих моделях, расстояние составляет примерно 48 метров, или 24 фокусных расстояния (Руттен и ван Венроой, 1988, стр. 87). При обсуждении условий Данжона и Кудера в гл. 1 было отмечено, что простая сферическая aberrация смещает лучи за пределы дифракционного диска примерно на $1/7$ длины волны. Таким образом, разделения в 20 фокусных расстояний будет достаточно для точности не менее $1/4$ длины волны и около 40 фокусных расстояний будет выходить далеко за пределы дифракционного предела.

Еще одна инструкция для читателя: если вы не можете измерить расстояние до источника из-за мешающих препятствий, попробуйте ошибиться в длинной стороне. Нельзя размещать источник слишком далеко. Если ваш ньютонский алгоритм имеет плавную ошибку чрезмерной коррекции (недостаточную коррекцию для рефракторов), поместите источник на большее расстояние и проверьте еще раз, прежде чем прийти к выводу, что ошибка связана с стеклом.

5.2.2 Диаметр искусственных источников

Надо тщательно подбирать размер отверстия в искусственном источнике, чтобы он был меньше разрешения прибора. С другой стороны, он должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить достаточное освещение для заполнения расфокусированного изображения светом. Чтобы вычислить такой диаметр, мы расширим радиус диска Эйри до расстояния до точечного отверстия. Если этот радиус выбран в качестве диаметра источника-обскуры, мы гарантируем, что источник не превышает половины угловой протяженности точечного изображения.

Этот расчет выполняется для расстояний, в два раза превышающих значения, указанные в Таблице 5-2. Результаты приведены в таблицах 5-3а и 5-3б. Беглый взгляд на эти таблицы показывает некоторые отверстия, которые будет чрезвычайно сложно сделать или измерить. Конечно, сделать отверстия точного размера диаметром всего 0,07 мм (или около 0,003 дюйма) — непростая задача. Но эти точечные отверстия относятся к необычным телескопам — например, 3-дюймовому $f/5$. Двадцатикратное фокусное расстояние 3-дюймового объектива $f/5$ составляет всего 300 дюймов (7,6 м). Относительно просто использовать отверстие в 4 раза больше (0,28 мм) и разместить его в 4 раза дальше (100 футов). Искусственный источник все еще находится всего в нескольких дворах.

Отверстие можно пробить в алюминиевой фольге. Чтобы проверить размер точечного отверстия, расширьте его в слайд-проекторе. Используйте проекционный объектив с известным фокусным расстоянием и разместите проектор на определенном расстоянии от экрана. Для

Таблица 5-3а
Максимальные диаметры в миллиметрах
для искусственных источников

Д(дюйм)	Д (мм)	Фокальное соотношение					
		4	5	6	8	10	15
2.4	61	0,07	0,07	0,08	0,11	0,13	0,20
3	76	0,09	0,07	0,08	0,11	0,13	0,20
4.25	108	0,12	0,08	0,08	0,11	0,13	0,20
6	152	0,17	0,11	0,08	0,11	0,13	0,20
8	203	0,23	0,14	0,10	0,11	0,13	0,20
10	254	0,28	0,18	0,13	0,11	0,13	0,20
12,5	318	0,35	0,23	0,16	0,11	0,13	0,20
14	356	0,40	0,25	0,18	0,11	0,13	0,20
16	406	0,45	0,29	0,20	0,11	0,13	0,20
17,5	445	0,49	0,32	0,22	0,12	0,13	0,20
20	508	0,56	0,36	0,25	0,14	0,13	0,20
24	610	0,68	0,43	0,30	0,17	0,13	0,20

Таблица 5-3б
Максимальные диаметры в дюймах
для искусственных источников

Д(дюйм)	Д (мм)	Фокальное соотношение					
		4	5	6	8	10	15
2.4	61	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,008
3	76	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,008
4.25	108	0,005	0,003	0,003	0,004	0,005	0,008
6	152	0,007	0,004	0,003	0,004	0,005	0,008
8	203	0,009	0,006	0,004	0,004	0,005	0,008
10	254	0,011	0,007	0,005	0,004	0,005	0,008
12,5	318	0,014	0,009	0,006	0,004	0,005	0,008
14	356	0,016	0,010	0,007	0,004	0,005	0,008
16	406	0,018	0,011	0,008	0,004	0,005	0,008
17,5	445	0,019	0,012	0,009	0,005	0,005	0,008
20	508	0,022	0,014	0,010	0,006	0,005	0,008
24	610	0,027	0,017	0,012	0,007	0,005	0,008

Например, если используется проекционный объектив диаметром 75 мм и расстояние проецирования составляет 5 метров, увеличение составит примерно $5000/75 = 66$ крат. Отверстие диаметром 0,28 мм расширяется за счет проекции до 18,5 мм (где-то около $1/4$ дюйма). Проверка приблизительной округлости завершает проверку. Будьте осторожны и не оставляйте фольгу светящейся в проекционных воротах дольше, чем на несколько секунд. Там это похоже на печь, и в металл передается огромное количество энергии. Если вы слишком сильно нагреете алюминий, крепление слайда может загореться.

Вы можете эффективно уменьшить большое отверстие до крошечного, используя другой метод. Если у вас есть доступ к хорошему объективу микроскопа с большим увеличением, вы можете отобразить большое точечное отверстие на его маленькой копии. Здесь поместите большое отверстие там, где обычно находится окуляр микроскопа (4–6 дюймов от резьбового конца объектива). Пролить свет через

через отверстие, а затем через объектив микроскопа в направлении, обратном тому, как микроскопы обычно обрабатывают свет. Объектив микроскопа направлен на удаленный телескоп, и кажется, что источник плывет в нескольких миллиметрах от объектива. Например, если точечное отверстие диаметром 1 мм поместить на расстоянии 100 мм за объективом микроскопа с фокусным расстоянием 5 мм, диаметр источника уменьшится примерно до 0,05 мм. Вы также можете использовать для этой цели окуляры с большим увеличением (также используемые задом наперед), но лучше всего подойдут объективы микроскопа.

5.2.3 Использование отражающей сферы вместо точечного отверстия

Даже если вам удастся кропотливо изготовить сам крошечный источник, вам придется прикрепить его к лампе или фонарику и сфокусировать немного света через крошечное отверстие. Создание настоящего источника-обскуры может оказаться трудоёмким занятием, но есть более простые способы изготовления источника, который также будет работать во всех отношениях.

Поскольку звездный тест предположительно является простым методом оценки готовой оптики телескопа, читатели, вероятно, не захотят получать сложные и сложные планы построения вспомогательного оборудования. Оптические устройства часто невозможно воспроизвести без доступа к тем же линзам и другим мелким гаджетам.

Однако проблему адекватного построения точечных источников необходимо каким-то образом решать. Популяризатор астрономии Джон Добсон рассчитывает свои зеркала с помощью звездного теста. Точечным источником служат блики и отражения, наблюдаемые на больших расстояниях. Он даже утверждает, что провел финальное испытание одного телескопа, используя отражение в глазу птицы.

Использование солнечного блеска в небольших сферических рефлекторах — отличный способ добиться необходимого небольшого размера и ослепительной силы. Добсон, скорее всего, использует вариант устройства, описанного ниже, когда нет подходящей и терпеливой птицы.²

Удобно, что каждый год огромное количество идеальных сферических отражателей изготавливается в виде елочных украшений из дутого стекла. Эти шары посеребрены внутри и обычно доступны в размерах от 2,5 до 7,5 см (от 1 до 3 дюймов). Если мы рассчитаем размер яркого источника света, отраженного в таком украшении, мы сможем использовать эти устройства для создания крошечных отверстий виртуального изображения точно известного размера. Вывод выражения для размера блесков включает в себя некоторые простые, но неинструктивные тригонометрические методы, поэтому оно помещено в Приложение F.

В выводе, приведенном в _____, следует отметить одну важную вещь.

²Я не рекомендую звездный тест как единственный метод тестирования во время изготовления. Лучше всего использовать его в качестве независимой проверки заводских испытаний. Звездчатый тест может сбить с толку, если два или более типа деформации поверхности приводят к ошибкам.

Приложение заключается в том, что вам не придется выполнять тригонометрические вычисления каждый раз, когда вы планируете использовать одну из этих сфер. Вы просто предполагаете, что изображение с блестками будет меньше примерно $1/300$ диаметр сферы при среднем солнечном отражении. Если свет отражается обратно к Солнцу (т. е. в сфере появляется почти центрированное отражение), солнечный диск на полградуса сжимается примерно до $1/450$ сферы.

Это $\approx 1/300$ приближение диаметра имеет определенные последствия, если рассматривать его в контексте Таблицы 5-3. Мы видим диапазон необходимых диаметров отверстий от 0,003 дюйма до 0,027 дюйма. В триста раз превышающий этот диаметр представляют собой отражающие сферы диаметром от 1 дюйма (25 мм) до 9 дюймов (23 см). Последняя сфера была рассчитана для рефлектора диаметром 61 см (24 дюйма) $f/4$, видимого на расстоянии 615 метров (0,38 мили). Он находится в очень необычном углу Таблицы 5-3. Фактически, самая большая точка источника, которая, вероятно, потребуется большинству читателей, — это 17,5-дюймовый рефлектор $f/4,5$. Его размер составляет около 0,016 дюйма (0,4 мм), что соответствует размеру блеска Солнца в сфере размером 5 дюймов (125 мм).

В Таблице 5-4 приведены приблизительные максимальные размеры виртуальных точечных отверстий для различных размеров отражающей сферы, куда попадает источник света. $1/20$ (приблизительно диаметр Солнца).

Таблица 5-4
Приблизительное виртуальное отверстие
максимальные размеры
(источник света – Солнце)

сфера (в)	"обскура" (в)	сфера (мм)	"обскура" (мм)
0,5	0,002	12,5	0,04
1.0	0,003	25	0,08
2.0	0,007	50	0,17
3.0	0,010	75	0,25
4.0	0,013	100	0,33
5.0	0,017	125	0,42
6.0	0,020	150	0,50
7.0	0,023	175	0,58
8.0	0,027	200	0,67
9,0	0,030	225	0,75
10,0	0,033	250	0,83

Немногие декоративные луковички имеют размер до 5 дюймов в поперечнике. Однако вы можете использовать блестки меньшего размера. Причина, по которой так много внимания уделяется размеру источника, заключается в том, что вам придется разместить эту сферу на расстоянии 300 метров (около $1/5$ миль) от 17,5-дюймового рефлектора. Это долгий путь, и вам нужны яркие изображения.

Сфера также не обязательно должна быть цельной. Выпуклое клейкое зеркало, обычно доступное в магазинах автомобильных запчастей, используется для увеличения угла обзора плоских зеркал заднего вида. Если вы нарисуете круг, диаметр которого равен диаметру

нужную вам сферу, вы можете отнести ее в магазин и прикинуть, какой из этих недорогих рефлекторов наиболее точно соответствует кругу.

Отражатели частичной сферы должны быть выровнены так, чтобы отражение было видно в направлении вашего прибора, но эта задача проста и продлится достаточно долго, чтобы вы могли провести неторопливую проверку.

И последнее замечание: другие авторы рекомендовали использовать черные сферы, потому что они затевают отражение окружающей среды, но при этом отражают Солнце. Глянцевые черные сферы уменьшают весь падающий на них свет. Вы можете получить эквивалентный эффект, используя фильтр нейтральной плотности от 1,0 до 2,0 на окуляре (затемняя не только сферу, но и все поле зрения). Использование глянцевой черной поверхности может быть хорошим решением при просмотре ослепительного изображения вблизи фокуса, но оно неэффективно при более дальней расфокусировке. Если вам необходимо уменьшить интенсивность, сделайте это с помощью фильтра окуляра, но начните с максимально яркого изображения. В качестве альтернативы часто бывает удобно разместить две сферы в непосредственной близости, одна меньше другой (например, блестящий шарикоподшипник рядом с елочным орнаментом). Например, проверку на небольшой уровень астигматизма лучше всего выполнять, слегка покачивая фокус по обе стороны от самого компактного изображения. Изображение большой сферы часто бывает слишком ярким, а меньшая сфера хорошо служит точечным источником для небольшой расфокусировки.

5.2.4 Настройка ночного искусственного источника

Устроить такое же отражение света можно и ночью, предусмотрев собственную подсветку. Свет больше не исходит под постоянным углом Солнца, поэтому при расстановке лампы требуется осторожность. Прикрепите фонарик к фотографическому штативу или другой регулируемой опоре и направьте его на сферу. Фонарик работает лучше всего, если его остановить примерно на 1 см и расположить на расстоянии около 1 метра. Эта процедура приблизит $1/2^\circ$ углового диаметра Солнца, поэтому таблицы выше будут работать одинаково. Вы можете добиться более узкого луча, если остановите фонарик вне оси, чтобы нить лампы не была видна напрямую. Для изготовления маски используйте плоский лист алюминиевой фольги. Выходной портал не обязательно должен быть идеально круглым. Фонарик следует располагать как можно ближе к прямой видимости.

Вы также можете захотеть сбалансировать цвет света, более близкий к свету настоящих звезд. Окрашивание лампы-источника особенно полезно при тестировании рефракторов. Большинство нитей накаливания имеют цветовую температуру черного тела около 2500°C или такую же красную, как Бетельгейзе. Спектр следует фильтровать либо с помощью окулярного фильтра бледно-голубого цвета (Wratten 80A), либо путем фильтрации излучения фонарика аналогичным голубым фильтром (Berry 1992). Идеальный фильтр корректирует освещение в помещении (например, «вольфрамовые» лампочки) для слайдовой пленки, снятой на открытом воздухе. Однако для большинства испытаний вы предпочтете один цвет, а

красноватый оттенок фонарика приветствуется. На самом деле, вы можете предпочесть протестировать сферы золотого цвета, которые также доступны в качестве елочных украшений.

Выберите место без случайных источников света. Тест в дневное время можно проводить практически где угодно, поскольку Солнце является самым ярким источником света, но тест в ночное время может быть затруднен из-за присутствия поблизости уличных фонарей. Ваш фонарик, вероятно, по-прежнему будет самым заметным источником отражения в сфере. Ведь оно близко и направлено прямо на сферу. Однако близлежащие мешающие уличные фонари создают вторичные точки блеска, а другие блики могут затруднить интерпретацию, особенно при очень небольших аберрациях расфокусировки.

Исключить случайные источники света легко. Например, вы можете сконструировать коробку-гармошку, чтобы затенить сферу от всех источников света, кроме света в направлении телескопа. Это небольшая картонная коробка, почерневшая внутри и имеющая сзади сложенный гармошкой черный плакатный картон. Эта складка действует как неглянцевый отвал балки. Однако чаще всего все, что действительно требуется, — это тщательно установленный капюшон. Еще проще идти туда, где нет паразитных огней. Ваше обычное место наблюдения предположительно представляет собой довольно темное место. Просто возьмите с собой испытательное оборудование.

У вас есть одна роскошь, которой нет у дневных тестировщиков: вы можете перемещать источник ближе к сфере, пока точечное отверстие не начнет превышать размер диска Эйри. На самом деле этот процесс упрощается, если в маске фонарика сформировать квадратное отверстие. Остановитесь и отведите фонарик на небольшое расстояние, когда появится этот квадрат.

5.3 Выполнение теста

Поскольку люди, желающие протестировать телескопы, обычно не имеют доступа к башням или удобной топографии, позволяющей поднять сферу, им приходится проводить испытания в условиях турбулентности земли. Дневное тестирование, вероятно, лучше всего проводить ранним утром и на травянистом поле, но в разных местах и время свое поведение. Часто тихое время нетурбулентного поведения ненадолго сохраняется ближе к закату. Продолжайте и пробуйте тест в любое время и в любом месте; Ты будешь приятно удивлен. Также постарайтесь расположить Солнце сзади, чтобы затенить окуляр и обеспечить примерно круглое отражение в сфере.

Вы можете закрепить сферу на жестком куске плакатного картона, просунув вешалку через отверстие, вырезанное в картоне. Если вы не используете доску и хотите повесить сферу на куст или дерево, обязательно покрасьте, заклейте скотчем или иным образом закройте место подвеса украшения. Он имеет несферическую кривизну, которая может представлять собой вторую интерферирующую точку света. Если вы используете изогнутое зеркало заднего вида, обязательно закройте его край, если он блестящий. (См. рис. 5-1.)

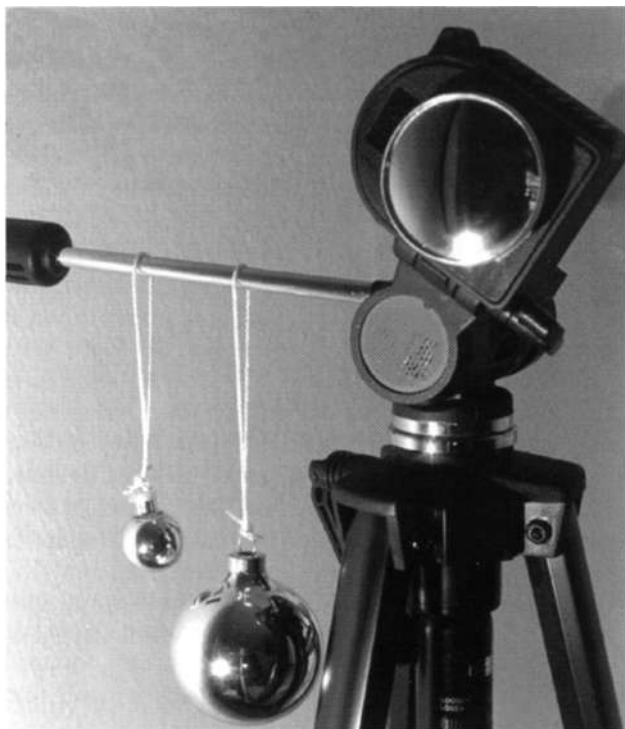


Рис. 5-1. Сферы освещаются большим прожектором, чтобы усилить отражение блеска. Показано выпуклое зеркало заднего вида, соединенное с головкой штатива. Точки случайного отражения еще не были закрыты скотчем.

Можно подумать, что лучше всего подойдет черный картон для плакатов, но однотонный темно-зеленый цвет тоже подойдет. Однородность важнее цвета, хотя яркие цвета использовать не следует.

Большинству телескопов требуются умеренные расстояния, но большие ньютоновцы с низким фокусным расстоянием требуют длинных и чистых полей для испытаний. Большие расстояния, отвечающие другим требованиям, иногда трудно найти. Возможно, вам удастся найти прямые участки проселочной дороги, возможно, пересекающие удобную долину. Обязательно установите испытательный полигон на траве с наветренной стороны дороги. Вы не хотите, чтобы тепло асфальта мешало тесту. Кроме того, избегайте оптических путей, пересекающих крыши зданий. Общественные парки идеальны, так как они имеют большие пространства с травой и могут быть даже относительно пустынными рано утром.

Если у вашего телескопа тонкое зеркало, будьте готовы к астигматизму. Думайте о тонком зеркале как о гибком. Перевернутый, он провисает. Если у вашего телескопа тяжелое зеркало (толстое или тонкое), также учтите, что оно может немного деформироваться. Это особенно

правда, если вы не держите зеркало аккуратно на перевязи, хотя иногда оно появляется даже в этом случае.

Такие модели не будут напоминать аккуратно симметричные диаграммы, представленные в главе «Защемленная оптика», поскольку сжиматься могут только две опоры. Если вы не можете устранить этот эффект путем тщательного монтажа, вам придется провести испытания под повышенными углами на реальных звездах.

Вы можете обнаружить, что ориентация телескопа меняется, когда инструмент направлен на горизонт. Поскольку оптика установлена свободно, постарайтесь создать ситуацию с небольшим наклоном оптической оси вверх. Если повезет, оптика откинется назад и упирается в естественные опоры. Либо выберите испытательный полигон с естественным уклоном вверх, либо установите источник выше. В худшем случае вам может потребоваться временная точная настройка для теста. Можно предположить, что стеклянные изоляторы ЛЭП так популярны в качестве изогнутых отражателей только потому, что их удобно монтировать на опорах.

Затем попробуйте «мгновенный тест». Покачайте фокусирующую по обе стороны от самого резкого изображения, вы увидите, как сложно настроить фокус. В самой желательной ситуации фокус как будто встает на место, и где бы вы ни остановились, вы всегда убеждены, что ограничивающим фактором фокусировки является ваша неспособность удержать руку от поворота точно на самом четком изображении. (Во многом это зависит от фокусного расстояния и того, насколько устойчиво установлен телескоп.) Наименее желательной является ситуация, когда фокус выглядит примерно одинаково хорошо в любом диапазоне хода фокусера. Вы дрейфуете в области наилучшего сосредоточения, не в силах принять решение. Зрительно-моторная координация далеко не ограничивающий фактор (Suiter 1990).

Если у вас сильная зрительная способность аккомодации, вам необходимо предоставить объект доминирующего поля, чтобы удерживать фокус глаза, пока вы меняете фокусирующую. Таким объектом является сетка на плоскости поля окуляра. Если у вас есть окуляр сетки с подсветкой размером 12 мм или ниже для фотографического наведения, вы можете использовать его (возможно, с хорошим прицелом Барлоу). Если у вас нет направляющего окуляра, протяните кусок черной изолянтной посередине диафрагмы окуляра с большим увеличением (ограничителем является отверстие на нижней стороне). Если вы поместили ленту близко к лучшему фокусу окуляра, вы увидите, что половина поля зрения окуляра закрыта тенью с острыми краями. Поместите изображение точечного источника рядом с прямым краем искусственного узора. Ваш взгляд естественным образом сосредоточится на большом высококонтрастном крае. Затем вы можете по своему желанию изменять фокус изображения, при этом фокус вашего глаза удерживается, как если бы он был в тисках. Этот психологический трюк часто встречается в фокусирующих устройствах для фотоувеличителей.

Ищите отдельные отклонения, следуя инструкциям в главах, посвященных им. При проверке рефракторов на оптические ошибки, не имеющие ничего общего с цветокоррекцией, вам может оказаться полезным использовать на окуляре темно-желтый или зеленый фильтр. Фактически, использование цветного фильтра — хорошая стратегия для

все телескопы, будь то рефлектор или рефрактор. Несмотря на то, что отражатели не имеют явных цветовых ошибок, звездный тест по-прежнему вызывает путаницу из-за ограниченной полосы пропускания белого света. Например, красный свет с длиной волны 630 нм может быть не в фокусе на 10 длин волн, а глубокий синий свет с длиной волны 420 нм — на 15 длин волн не в фокусе. Цветной фильтр уменьшает диапазон длин волн, влияющих на изображение.

Еще один полезный инструмент — маска препятствия 33% для вашего телескопа. Это обеспечивает однородное препятствие для критических испытаний на сферическую аберрацию. Маску легко надеть на крестовину рефлектора. Просто нарисуйте круг размером в одну треть диаметра вашего главного зеркала на тонком картоне толщиной примерно с папку для документов. Вырежьте его и сложите вчетверо. Затем отрежьте кусочек длиной от 6 до 10 мм возле вершины буквы V в центре сгиба. Откройте его и разгладьте. Центральный разрез становится крестом. Наденьте его на выступающую заднюю сторону паука. Для диафрагм Шмидта-Кассегрена с диафрагмой f/10 маска не требуется, поскольку их непроходимость в любом случае составляет около 33%. Маску-рефрактор можно вырезать из бумаги. Подвесьте препятствие на полоске швейных ниток, прикрепленной скотчем к розовой головке. Конечно, если ваше препятствие преодолено, 1/3 диафрагма уже открыта, эта опция вам недоступна. В любом случае такие телескопы обычно являются специальными инструментами, для которых дополнительное препятствие допускается для обеспечения какого-то другого преимущества.

В качестве примера того, как использовать эти таблицы от начала до конца, а также в качестве дорожной карты процедур и ошибок, с которыми вы можете столкнуться при тестировании звезд в телескопах, оставшаяся часть главы описывает процедуру тестирования для четырех воображаемых инструментов.

5.3.1 8-дюймовый рефлектор Ньютона f/6

В Таблице 5-2 мы находим, что расстояние до источника для λ Ошибка длины волны /8 равна 2×12 . Жили в 24 раза больше фокусного расстояния 4 футов. Умножение дает расстояние до источника 96 футов (29 м). В таблицах 5-3а или 5-3б указано, что диаметр источника составляет около 0,10 миллиметра или около 0,004 дюйма.

Этот диаметр точечного отверстия, умноженный на 300, указывает на отражение Солнца в сфере диаметром 30 мм. Поскольку это достаточно близко к декоративной лампочке диаметром 1 дюйм (25 мм), мы будем использовать ее. Не делайте много дополнительной работы, чтобы точно соответствовать этим параметрам. Нет необходимости тщательно измерять 29-метровый полигон. Чувствительности звездного теста такая точность не способствует и не мешает. Уменьшите расстояние; тридцати пяти шагов должно быть достаточно. Если единственный доступный сферический рефлектор имеет диаметр 2,5 дюйма, вы можете легко пройти вдвое большее расстояние, примерно до 200 футов (60 м). *Т* контролируют, а не тестируют.

Тир установлен на травянистом газоне. Сейчас около 8 часов утра, сфера расположена на юго-юго-западе. Солнце находится слева от тестера

плечо.

Из таблиц 5-1a и 5-1b следует отметить, что ход фокусировки, необходимый для достижения абберации дефокусировки в 12 длин волн, составляет 1,9 мм (0,075 дюйма). Фокусирующий убирается $\frac{3}{4}$ дюйма за оборот, поэтому мы будем поворачивать фокусер менее чем примерно на $\pm 1/10$ хода для большинства проверок аббераций.

Первое, что вы заметите при просмотре расфокусированного изображения, — это кажущееся сильное рассогласование. Когда вы настраивали телескоп, вы проверили грубую юстировку, и все было в порядке. Вы заменяете смотровой окуляр. Точка зеркала все еще находится в центре. Что происходит?

Затем вы замечаете, что фокусер отодвинут назад на 50 мм дальше обычного. Фактически, вам пришлось покопаться в коробке с окуляром, чтобы найти трубку расширителя фокуса. Вы снова смотрите в смотровое отверстие и на этот раз видите проблему. В этом положении фокусировки край диагонального зеркала отсекает внешнюю часть зеркала. Виньетирование с одной стороны немного хуже, чем с другой, что объясняет смещенную от центра диагональную тень. Расфокусированный диск на самом деле не так уж сильно смещен, он просто не полностью освещен.

Вы подходите к сфере, берете ее и делаете еще 30 шагов назад. Вернувшись к телескопу, вы вставляете окуляр и фокусируетесь; это примерно на дюйм ближе к трубке. Вытащив окуляр и вставив обратно смотровое отверстие, вы теперь можете видеть отражение всего зеркала по диагонали. Навскидку вы понимаете, что на этом новом расстоянии можно было бы использовать сферу побольше. Вы все равно решаете попробовать; кажется достаточно ярким.

На этот раз вы заметили, что вторичная тень слегка наклонена влево от расфокусированного изображения. Такой внешний вид указывает на реальное несоосность. Вы закручиваете соответствующий винт на ячейке главного зеркала (см. главу 6) и снова проверяете изображение. Это хуже. Вернувшись к регулировочному винту и отменив предыдущую регулировку, вы слегка поворачиваете его в противоположную сторону.

Проверив еще раз, вы видите гораздо лучшее выравнивание. Еще несколько мелких корректировок и выравнивание закончено. Коллимацию, вероятно, придется переделать, прежде чем телескоп будет использоваться на возвышенных объектах, поскольку трубка в сборе необычно напряжена для этого горизонтального угла. На этом этапе вы ищете заземление или астигматизм. Вы не видите таких эффектов, но ведь это зеркало маленькое, во всю толщину и аккуратно установлено.

Выполняя моментальный тест, вы видите, что изображение быстро фокусируется. Это хорошие новости. Вы смотрите на расфокусированное изображение и пытаетесь обнаружить в небольшой турбулентности неподвижный рисунок, указывающий на шероховатость поверхности. Вы ничего не видите, но вы проверите это состояние позже в темноте. Трудно обнаружить шероховатости в любой турбулентности, даже незначительной, которая сейчас беспокоит прибор. Одним из положительных моментов является плавное появление дифракционных минимумов; они были бы грубыми или сломанными, если бы

шероховатости были серьезными. Вы ставите желтый фильтр на окуляр. Кажется, что фильтр недостаточно глубокий, потому что многие цвета все еще можно увидеть (на самом деле ошибка цвета кажется еще хуже). Вы надеваете зеленый фильтр. Теперь минимумы более заметны.

Поверните фокус вперед и назад на равные расстояния по обе стороны от фокуса, чтобы обнаружить сферическую аберрацию. Напомним, что это проявляется в виде полого центра с одной стороны фокуса и яркого центра, который уменьшается к краю с другой стороны. Некоторая тенденция в этом направлении просматривается, но она не является серьезной. Вы надеваете стандартную маску препятствия 33% на выступающий болт в задней части паука и очень тщательно находите лучший фокус. Затем вы увидите, как далеко вам нужно переместить фокусер внутрь и наружу, чтобы тень от диагонали равномерно появилась в центре. Тьма появляется почти мгновенно при фокусе внутрь, но ненадолго гаснет при движении наружу.

Это субъективное мнение, поэтому вы заменяете зеленый фильтр фильтром нейтральной плотности, чтобы несколько изменить условия, и пробуете еще раз. Используя красный фильтр, вы получаете свежую оценку. Вы удаляете все фильтры и пробуете еще раз. Кажется, что среднее соотношение этих движений составляет 1:2 или 1:3. Это может означать, что у вас немного недокорректированное зеркало (см. главу 10).

Сняв маску, вы затем расфокусируете инструмент от дальнего внутреннего фокуса к дальнему внешнему фокусу, все время ища провалы или очень яркие кольца, которые будут обозначать зоны. Вы не видите жесткой кольцевой структуры.

Последний тест предназначен для перевернутой кромки. Обычно вы это ищете, надев фильтр насыщенного цвета (красный подойдет) и проверьте видимость дифракционных минимумов внутри фокуса по сравнению с вне фокуса. Если загнутый край является единственной аберрацией, кольца сильные и четкие снаружи и слабые или размытые внутри. Однако эффект перевернутого края конкурирует с эффектом недокоррекции, который также имеет тенденцию размывать дифракционные кольца за пределами фокуса. Вы смотрите в окуляр с фильтром и не можете толком определиться в этом вопросе. Одна аберрация затуманивает другую.

Оценка: Этот телескоп должен удовлетворительно работать на планетах, но мог бы и лучше. Он находится на грани технических характеристик, поэтому жаловаться производителю не стоит. Оптика вроде бы не сильно шероховатая, но тест на шероховатость придется дожидаться темного поля зрения и меньшей турбулентности. Телескоп приобретался для универсального использования, и с этой задачей он должен справляться хорошо.

5.3.2 16-дюймовый объектив Добсона с диафрагмой f/4 и ньютонским объективом

Этот телескоп потребует большего расстояния от источника. В Таблице 5-2 показано, что расстояние в 84 фокусных расстояния приведет к сферической гиперкоррекции на 1/4 длины волны, поэтому вы удваиваете это расстояние и переходите к 168 фокусным расстояниям; 16 дюймов $\times 4 \times 168 = 10\,752$ дюйма, или 896 футов (273 м). Требуемый размер отверстия составляет 0,018 дюйма или 0,45 мм. Для использования отражения Солнца потребуется отражающая сфера диаметром более 5 дюймов.

В коробке с елочными украшениями вы не можете найти подходящую сферу, поэтому идете в магазин автомобильных запчастей и рассматриваете клеющиеся широкоугольные зеркала заднего вида. Найденное там маленькое зеркало имело бы диаметр около 7 дюймов, если бы оно было полной сферой. Оно немного великоват, но достаточно близко. Помните, что в таблице диаметров точечных отверстий у вас есть коэффициент два, прежде чем ваш источник превысит размер диска Эйри.

Вы заклеиваете внешние несколько миллиметров зеркала из-за вторичного отражения в блестящей рамке. Вы используете малярный скотч, потому что цвет на самом деле не имеет никакого значения. Ища регулируемое крепление, вы думаете о дешевом штативе для камеры с регулируемой шаровой головкой. Кусок дерева, прикрепленный к головке штатива, будет удерживать изогнутое зеркало.

Затем начинается поиск испытательной площадки. Наконец вы находите длинный подъем на север. Его пересекает дорога, на которой могут возникнуть проблемы из-за турбулентности, но вы готовы рискнуть. Вы устанавливаете штатив-источник в 9 утра на верхнем конце склона. Сделав несколько шагов в сторону телескопа и опустив голову на линию взгляда, вы убедитесь, что Солнце находится в центре изогнутого зеркала. Кроме того, вы проверяете штатив на наличие паразитных отражений и заклеиваете все заметные отблески.

Спуститься по склону около 2/10 миль (или 0,3 км) и установите 16-дюймовый. Беглый взгляд в 6-мм окуляр подтверждает, что оптический путь серьезно нарушен турбулентностью (утро уже поздно). Вы сдаетесь и решаете провести тест во время ночного сеанса на своем наблюдательном пункте. Таким образом, телескоп, скорее всего, будет работать в менее турбулентной среде.

Около 21:00. Уже на следующую ночь надвигаются высокие перистые облака и портят вид. Вы решаете проверить зеркало и тем временем надеетесь, что облака рассеются. Проезжая по гравийной подъездной дороге, ведущей к участку, вы снова размещаете сферу на расстоянии примерно 0,3 км. Однако на этот раз фонарик находится на штативе, поэтому сфера подвешивается к ограде пастбища. Фонарик имеет в маске отверстие диаметром 1 см и расположен на расстоянии около 1 м от парциальной сферы. Вы расположите его недалеко от оптического пути между сферой и телескопом, так что вы получите маленькое круглое отражение.

Поскольку траектория ближе к уровню, телескоп может потерять ориентацию из-за крена. Глядя на сферу, вы обнаруживаете, что она действительно потеряла коллимацию. Поднимая телескоп к зениту, вы осторожно встряхиваете его.

и ослабьте его обратно. Это лечит проблему.

Затем вы проверяете изображение на предмет сжимания и астигматизма. Изображение действительно имеет тенденцию образовывать крест в фокусе, но это не так уж и плохо, чтобы мешать важному тесту на сферическую aberrацию.

В моментальном тесте изображение фокусируется не так быстро, как хотелось бы. Однако вы можете легко сфокусировать взгляд от 100 мм до бесконечности и заподозрить, что ваша аккомодация делает моментальный тест ненадежным. Вы заменяете 6-миллиметровый окуляр на 12-миллиметровый окуляр с подсветкой на высококачественной линзе Барлоу и повторяете привязку, все время следя за тем, чтобы перекрещенные нити сетки оставались четко в фокусе. Фокус все еще не определен в отношении значительного региона. Это не хорошо.

Прикрепив маску 33% к спине паука, вы проверяете корректность. Тень почти сразу появляется внутри и остается большой и темной до тех пор, пока телескоп не сильно расфокусируется. С другой стороны он не появится, пока вы не прокрутите фокусер еще 6–10 раз, после чего он выйдет из яркого ядра. Фильтры лишь незначительно меняют эту ситуацию. Зеркало кажется глубоко недокорректированным.

У вас есть мрачное подозрение, что большой размер сферы, возможно, ослепляет ваше зрение. Вернувшись к источнику, вы увеличиваете расстояние, разделяющее фонарик и сферу, до 2 м. Даже на более темном изображении все еще видна серьезная недостаточная коррекция.

Кольца не видны ни с одной стороны — возможно, из-за неровностей или турбулентности. Кольца также не отображаются с зеленым фильтром. Однако один тест не определяет шероховатость, особенно для такого большого инструмента, как 16-дюймовый, поэтому вы оставляете за собой право судить по этому вопросу.

Недостаточная коррекция настолько плоха, что вы даже не обращаете внимания на повернутые фронты или зональные aberrации.

Оценка: Телескоп выходит из строя. Его необходимо переформить. Если бы оно было хоть немного хуже предельной $1/4$ длины волны, это было бы приемлемо. В конце концов, нечасто ожидаешь получить оптику с ограниченной дифракцией при диафрагме $f/4$. Но этот инструмент находится далеко за пределами приемлемости.

5.3.3 6-дюймовый апохроматический рефрактор $f/12$

Поскольку ожидается, что этот телескоп будет хорошо работать в самых сложных условиях, он будет подвергнут сравнительно суровым испытаниям. Двадцатикратное фокусное расстояние составляет 120 футов или 37 метров. Чтобы избежать виньетирования из-за помех и ошибочной оценки сферической aberrации, увеличьте это расстояние до 80 м. Интерполируя таблицу 5-3, вы видите, что диаметр отверстия около 0,16 мм будет правильным на расстоянии 37 метров, но вы идете вдвое дальше, поэтому вам нужно отверстие в два раза больше. Триста отверстий диаметром 0,32 мм дают 96 мм, или около 4 дюймов.

У вас есть только елочный орнамент диаметром 50 мм, но, поскольку вы будете проводить этот тест ночью, легко переместить фонарик-маскировку диаметром 1 см примерно на 60 см от сферы вместо обычного 1 м. Расстояние в 60 см означает, что отверстие будет стягиваться под углом чуть менее 1°, если смотреть со стороны сферы. Вы подкрепляете маску фонарика «вольфрамовым» фильтром камеры на 80 А, чтобы добиться лучшего цветового баланса для тестов на хроматическую аберрацию.

Взяв телескоп на свое обычное место наблюдения, вы подвешиваете сферу примерно в 250 футах от телескопа. Фонарик направлен на сферу с расстояния в пару футов, с ближней стороны. Поскольку полностью собранный телескоп неудобно расположен в направлении к горизонту, его помещают между сиденьями двух крепких «режиссерских» складных кресел. Вы будете сидеть на земле.

Вы пытаетесь навести телескоп, перемещая заднее кресло. Телескоп направлен к ногам штатива, поэтому вы поднимаете переднюю часть, вставив магазин. Сфера теперь находится слишком низко.

Кажется, перемещать цель проще, чем телескоп, поэтому вы идете к источнику и перемещаете сферу выше. Вы переставляете фонарик, проверяя, чтобы самое яркое отражение было направлено обратно в телескоп.

Изображение нужно только покачивать, чтобы центрировать его. Вы вставляете окуляр с большим увеличением. Первое, на что стоит обратить внимание, — это цветокоррекция. Диск имеет небольшую пурпурную или красноватую кайму внутри фокуса и зеленую кайму вне фокуса. В фокусе нет видимой цветовой дымки. Красная точка за пределами фокуса не появляется, но, поскольку вы тестируете апохромат, ее появление не ожидается. Радужное размытие не наблюдается ни в одном направлении, что указывает на отсутствие ошибки децентрации или клина. Было бы полезно получить более яркое изображение, поэтому переместите фонарик примерно на 30 см от сферы.

Сейчас диск Эйри заметно раздулся, но цветового помутнения не видно. Вы возвращаетесь к фонарику и отодвигаете его обратно.

Надев на окуляр зеленый фильтр, вы ищете астигматизм или растяжение как индикатор смещения. Ничего не видно. Расфокусируясь в любом случае, видимых сложностей с коррекцией не возникает. Телескоп хорошо фиксируется. Вы расфокусируетесь на большое расстояние и ищете зоны. Ничего не видно. Загнутый край не виден, но это рефрактор. Ячейка хрусталика закрывает дальний край.

Вас беспокоит отсутствие контраста в дифракционных кольцах. Это может указывать на проблему с шероховатостью. С другой стороны, ваш глаз может просто отвык от деликатности колец. Вы устанавливаете темно-красный фильтр, но он отсекает слишком много света, поэтому вы снова переходите к зеленому фильтру.

Кажется, что сфокусированное изображение имеет несколько асимметричных утолщений в кольцах, но это может быть вызвано медленными воздушными потоками между изображением и вами. Вы наблюдаете достаточно долго, чтобы решить, что закономерность зафиксирована.

Отцентрировав 33%-е бумажное препятствие на полотне швейной нити, вы

поиск небольших коррекционных трудностей. Вы не можете обнаружить никакой разницы.

Оценка. Этот телескоп может иметь небольшую неровность среднего масштаба, которая может испортить изображения в идеальные ночи. Такая небольшая aberrация осталась бы незамеченной в других инструментах. Тем не менее, в лунно-планетарном рефракторе это вызывает беспокойство. Однако вы решаете снова провести формальный звездный тест и оценить его несколько ночей на планетарных изображениях. Шероховатость — это aberrация, которую трудно однозначно отличить от турбулентности, и вы могли неправильно ее диагностировать.

5.3.4 8-дюймовый катадиоптрический объектив Шмидта-Кассегрена f/10

Чтобы проверить это Шмидта-Кассегрена, вспомните, что телескоп отклоняет лучи за край диска Эйри на расстоянии около 48 м (157 футов), или примерно в 24 раза больше фокусного расстояния. (В Таблице 5-2 указано неправильное расстояние, поскольку внутренний механизм фокусировки ухудшает оптическую коррекцию.) Вы решаете увеличить расстояние как минимум до 100 м (328 футов). Источник в этом диапазоне в 2,5 раза превышает 20 фокусных расстояний, рекомендованных после Таблицы 5-2, поэтому для него требуется размер точечного отверстия 0,134 мм, в 2,5 раза больший, чем в Таблице 5-3, или 0,335 мм. Таким образом, отражающая сфера должна иметь диаметр 100 мм. У вас нет 4-дюймовой сферы, но вы можете найти выпуклое зеркало, диаметр которого был бы 7 дюймов, если бы оно было полной сферой.

Отверстие может расширяться в 2 раза, прежде чем оно превысит размер диска Эйри. Однако семь дюймов — это немного близко к пределу. Затем вы вспоминаете, что если вы проводите тест, когда Солнце находится прямо у вас за спиной, а точка блеска находится в центре сферы, то делитель будет ближе к 450, чем к 300. Это условие позволит получить сферу диаметром не менее 6 дюймов, а 7 дюймов — нет. слишком многое другое.

Вы назначили тест однажды рано утром, когда солнце было низко. *на* восточный горизонт и прицельная дальность на запад. Быстрый взгляд в окуляр подтверждает, что изображение слишком яркое. Поспешив внутрь за 2-дюймовым елочным орнаментом, вы устанавливаете новую сферу на расстоянии 70 метров и снова наводите инструмент. Своеобразный ток трубки удлиняет вторичную тень по одну сторону фокуса, но через несколько минут она исчезает.

Сначала идет выравнивание — относительно простая операция, поскольку она включает в себя настройку только одного элемента. Надев темно-желтый фильтр, вы проводите моментальную проверку, но не можете точно сказать, сработает ли прибор адекватно. Фокус кажется мягким, но серьезно не дефектным.

Вы обнаруживаете небольшую сферическую aberrацию, но не можете сказать, недостаточная это коррекция или чрезмерная коррекция. Телескоп перефокусируется с помощью обычного окуляра большого увеличения и желтого фильтра, установочный винт ослабляется, а окуляр выдвигается на 1/5 дюйма (5 мм). Сверившись с таблицами 5-1а и 5-1б, вы видите, что эта сумма соответствует примерно 12 длинам волн в

фокус. Край узора прочнее внутреннего, поэтому система перекорректирована.

Поскольку препятствие в 33% уже имеется, вы ожидаете первого появления вторичной тени. На другой стороне оно кажется лишь примерно в 1,5 раза дальше. Поскольку ожидается, что инструмент в любом случае будет выглядеть слегка перекорректированным (при близком положении источника), эта величина очень невелика.

В поисках неровностей вы обнаружите необычную турбулентность даже в такое раннее утро. Вам придется проверить еще раз, когда станет тише.

Оценка. Прибор показывает хорошие результаты, но турбулентность грунта слишком сильная. Наблюдения за планетой Сатурн той ночью показали, что деление Кассини выглядело резким и черным между приступами плохой видимости. Вы повторите тест ночью, используя фонарик.

Глава 6

Несоосность

Самый простой способ значительно улучшить изображение телескопа — это отрегулировать оптику. Смещение является одной из наиболее игнорируемых оптических проблем и одной из наиболее излечимых. Улучшения, полученные за счет совмещения ранее игнорируемых инструментов, всегда заметны, а иногда и поразительны.

Звездообразный тест можно использовать не только для диагностики смещения, он также полезен для достижения точного выравнивания. Как только вы познакомитесь с методом звездной проверки, позволяющим вносить последнюю небольшую корректировку коллимации, вы сделаете это стандартной процедурой во время каждого сеанса наблюдений. По мере практики выравнивание звездного теста становится простым.

6.1 Кинематический вид центровки

Оптическая поверхность представляет собой трехмерный объект конечного размера. Чтобы найти такой объект в пространстве, нужно сначала найти некоторую точку (обычно ее геометрический центр) и переместить три линейные координаты этой точки. После размещения центра необходимо зафиксировать два оставшихся угла ориентации, чтобы указать его положение. На самом деле математики описывают три таких угла поворота, но симметрия обычно позволяет игнорировать один из них. Для выравнивания этот скрытый угол представляет собой финальное бессмысленное вращение вокруг симметричной оптической оси.

Три координаты центра, а также эти три угла составляют шесть степеней свободы, необходимых для точного определения положения и ориентации твердого объекта. Точки крепления хорошо спроектированы, если их достаточно для фиксации местоположения объекта, но не для его чрезмерного ограничения. Табуреты на трех ножках устойчивы на самых неровных полах, поскольку их трехточечная конструкция одновременно необходима и достаточна. Жесткие табуреты на четырех ножках обычно раскачиваются, потому что в конструкции слишком много опор. Четвертую ногу невозможно расположить точно в плоскости пола. Эта трудность также возникает

имеет значение по той причине, что ячейки крепления оптики часто кратны трем точкам.

Выравнивание обычно разделяется на две независимые задачи. Во-первых, центры всех оптических элементов располагаются на одной оси и правильно разнесены. Во-вторых, наклоны каждого оптического элемента ориентированы так, что каждый становится кругом вращения вокруг оси. Таким образом, если повернуть оптическую систему вокруг оси, она будет выглядеть одинаково. Расположение центра на оси называется *центрирование*, и получение правильной ориентации наклона называется *квадратура* некоторыми авторами.¹

6.2 Последствия смещения

Если выравнивание не является точным, это может привести к любому количеству плохих последствий. Хотя мы будем рассчитывать закономерности только для смещенных ньютоновских отражателей, изображенное здесь поведение качественно описывает широкий спектр систем и в целом полезно.

Вне оси ньютоновский рефлектор демонстрирует смесь двух чистых aberrаций: комы и астигматизма. В этом случае астигматизм не притирается к стеклу навсегда. Это вызвано просмотром зеркала под косым углом. Точно так же кома вызывается просто наклоном зеркала.

По мере того, как смещение ухудшается, астигматизм вытесняет кому и становится доминирующей aberrацией. Кома ухудшается линейно с увеличением ошибки коллимации, а астигматизм увеличивается пропорционально квадрату расстояния до оптической оси. Такое поведение показано на рис. 6-1. Во всех практических случаях смещения точка пересечения всегда находится за пределами даже грубого выравнивания. Для ньютоновских телескопов кома всегда сильнее наведенного астигматизма.

На ярких участках комического изображения образуются крылья в форме придатков, и часть света размывается от оптической оси. Эффекты комы одинаковы как внутри, так и снаружи фокуса. В каждом случае aberrация растягивает изображение от оптической оси.

Перекося изображения у ньютоновцев легче воспринимается вне фокуса. Искаженная оптика больше не имеет центрального препятствия, а вне фокуса тень от диагонали, смещенная от центра, усиливает растяжение, вызванное комой. Из-за смещенной тени кома кажется еще хуже. Внутри фокуса смещенная от центра тень наклоняется таким образом, что частично уравнивает растяжение комы. Выравнивание по обеим сторонам фокуса возможно, но предпочтительным методом является отведение окуляра назад.

Астрономические телескопы имеют настолько ограниченное поле зрения, что кома, вызванная объективом, обычно не видна, если только оптика не неисправна.

¹Телескопы с наклонными компонентами не следуют такой простой последовательности. Они требуют процедуры, соответствующей конкретному инструменту.

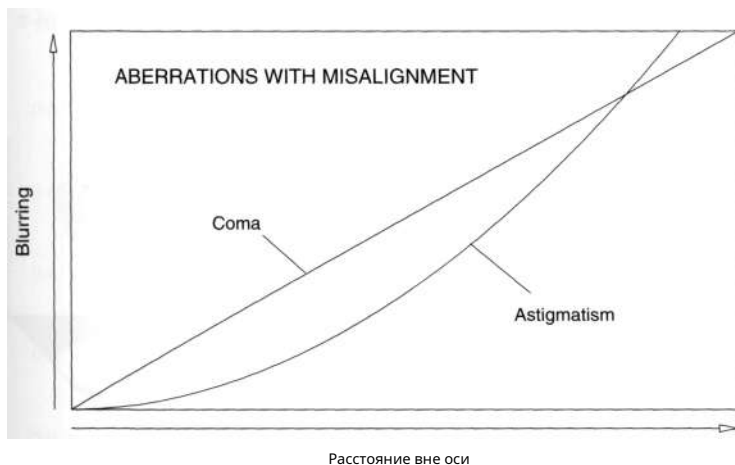


Рис. 6-1. Астигматизм и кома-абберации, возникающие из-за несоосности, усугубляются в ньютоновских рефлекторах.

выравнивается, и изображение просматривается при большом увеличении. Любое внеосевое размытие изображения в маломощных окулярах – это прежде всего вина окуляра.

К сожалению, кома и астигматизм в сложной форме являются распространенными ошибками в плохо коллимированных ньютоновских рефлекторах и катадиоптриках. Хорошо спроектированные рефракторы и усовершенствованные рефлекторы используют множество поверхностей для уменьшения или устранения ошибки комы. Хорошие рефракторы в основном демонстрируют рассогласование из-за астигматизма.

Выравнивание, вероятно, является единственной причиной незаслуженной потрепанной репутации ньютоновских рефлекторов. Эти инструменты обычно изготавливаются с очень низким фокусным расстоянием. Их владельцы не осознают, что их телескопы необходимо держать в идеально точном положении. Быстрый ньютоновец обычно проводит все свое существование в плохом состоянии коллимации. Конечно, если используются малые увеличения, зона идеального совмещения обычно находится где-то в пределах диафрагмы окуляра. Однако при больших увеличениях (когда оптическое качество должно быть наилучшим) область фокальной плоскости хорошего качества может находиться на одном краю диафрагмы или, возможно, полностью за ее пределами.

В качестве примера давайте внимательно рассмотрим обычный 10-дюймовый (250 мм) ньютоновский рефлектор $f/4,5$. Шредер (стр. 96) говорит, что параболюиды с диафрагмой $f/4,5$ могут выдерживать смещение около 1,8 угловых минут. Таким образом, превосходные изображения ограничиваются областью в фокальной плоскости диаметром всего 0,05 дюйма (1,2 мм). Однако эта терпимость несколько жесткая. «Достойное» изображение допускает смещение примерно на 3 угловые минуты, круг в фокальной плоскости диаметром 0,08 дюйма (2 мм). Проходимая область — круг $1/5$ диаметр

полнолуние. Это выравнивание нарушается всего лишь примерно/10 оборотов регулировочного винта главного зеркала.

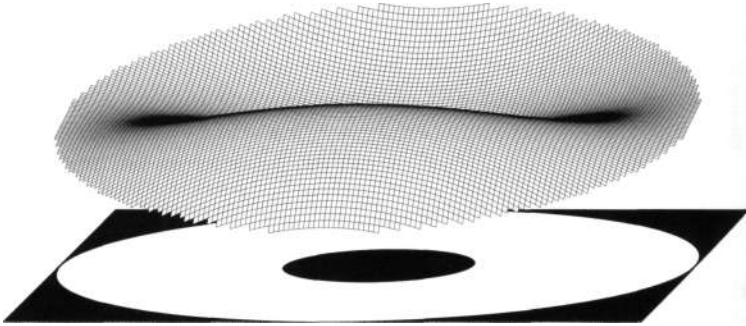


Рис. 6-2. Абберационная функция смещенного волнового фронта сразу после того, как он прошел через апертуру.

6.3. Абберационная функция смещенного ньютоновского закона

Если сфокусироваться вблизи наименьшего круга размытия изображения, абберационная функция смещения аналогична сложной форме, показанной на рис. 6-2. Эта цифра едва ли отражает деформацию. Фазовая поверхность подобна пластику барабана, который только что получил сильный удар, смещенный от центра. Один полукруг деформирован вниз, а другой полукруг имеет балансирующую выпуклость вверх. К этой форме добавляется небольшая седловидная или картофельная деформация, характерная для астигматизма. Совокупный результат представляет собой удивительно интересную поверхность для исследования с помощью вычислений, но это плохая новость, если она описывает волновой фронт телескопа.

Функциональной формой абберации комы является

$$V_{Tкома}(\rho, \theta) = \frac{A_{кома}}{2} (3\rho^3 - 2\rho) \text{ потому что } (\theta), \quad (6.1)$$

где ρ — расстояние от оптической оси (нормированное до 1 на краю апертуры), $A_{кома}$ — это полная кома-абберация, и θ — угол от оси смещения (Борн и Вольф, 1980). Небольшая степень астигматизма, смешанная с этой комой, имеет форму, описанную в главе 14, а общая деформация равна $V_{Tсмещать} = V_{Tкома} + V_{астиг}$. Величина каждой абберации зависит от диафрагмы и фокусного расстояния.

астиг

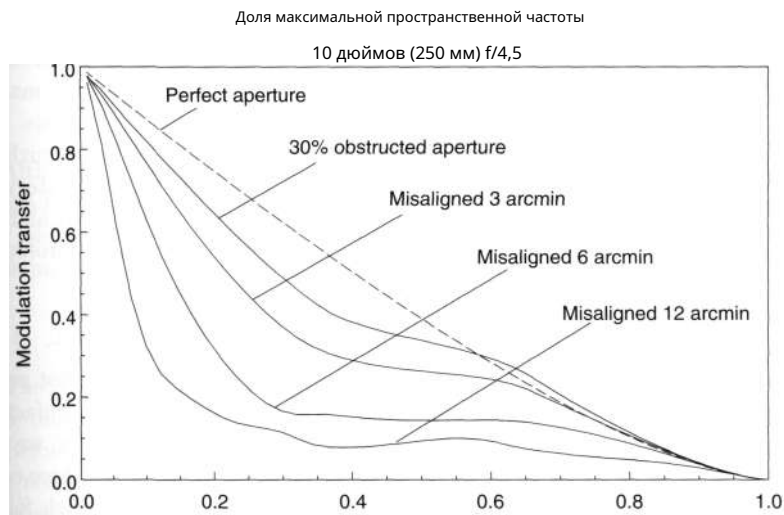


Рис. 6-3. Передаточная функция модуляции постоянно ухудшающегося ньютоновского выравнивания (45° ориентация целевых полос MTF относительно направления смещения).

6.4. Фильтрация смещенного ньютоновского уравнения.

Поскольку фазовая поверхность не является аксиально-симметричной, ее ФПМ зависит от того, в какую сторону ориентированы полосы мишени ФПМ. Если мы рассчитаем MTF при средней ориентации, мы увидим, как поведение улучшается при лучшей коллимации. Пять кривых изображены на рис. 6-3. Во-первых, это идеальная круглая апертура. Следующее — закрытая на 30%, но в остальном идеальная апертура. В-третьих, это фильтрация, вызванная смещением фокальной плоскости в сторону из-за допуска в 3 угловые минуты. Если этот сдвиг увеличить вдвое, контраст на четвертой кривой значительно ослабнет. Последняя и нижняя кривая представляет собой перенос, ожидаемый от сильно смещенного зеркала. Любая попытка выравнивания приводит к лучшей коллимации, чем предыдущая кривая, но некоторые владельцы ньютоновских моделей настолько боятся ухудшения характеристик, что отказываются прикасаться к регулировочным винтам.

Худшая кривая MTF быстро падает. Интересное поведение наблюдается в нижней части оси пространственной частоты. Первоначальное падение указывает на то, что телескоп работает так же хорошо, как и его апертура составляет примерно 1/4 полного диаметра. Сильное смещение снижает контраст низких пространственных частот до контраста 2,5-дюймового телескопа!

Даже исправление смещения до тех пор, пока ось не будет наклонена в два раза больше допуска, только улучшит контраст, поэтому это зеркало действует как половина его апертуры. Эта кривая MTF примерно такая же, как и для 50% или

Закрытое отверстие на 60%. Никто не стал бы мириться с такими огромными препятствиями, но многие владельцы телескопов легкомысленно принимают рассогласования такой величины.

Фильтрации даже слегка смещенного телескопа достаточно, чтобы серьезно ухудшить изображения. Будьте бесстрашны, пытайтесь коллимировать свой телескоп. Вряд ли вы сможете добиться большего, чем несогласованный инструмент, и потенциальные улучшения, достигнутые с помощью лишь небольших усилий, могут быть глубокими.

6.5. Выравнивание трех телескопов

Процедуру юстировки для каждого коммерческого телескопа невозможно описать, потому что у каждого производителя есть небольшие различия в изготовлении кювет, держателей зеркал и юстировочного оборудования. По этой причине мы рассмотрим общие особенности процесса, используемого при юстировке только трех обычных телескопов. Несмотря на это ограничение, последующие описания представляют большое количество оптических систем. Вам не дадут подробных инструкций в виде рецепта, который нужно выучить наизусть («затем поверните болт А»). Лучше всего эту задачу выполняют инструкции, прилагаемые к инструменту. Вместо этого вас научат процедурам, которые можно применить практически к любому телескопу.

В других процедурах коллимации используются специальные методы или инструменты. Читателям-кискам предлагается продолжить их. Однако приведенные ниже инструкции позволяют выполнить достаточно простую коллимацию, не тратя слишком много драгоценного времени на наблюдения. Основной целью будет обоснование и упорядочение шагов с дополнительными комментариями, касающимися хитростей и ловушек.

- 1. Установите осевую линию.** Линия оси определяется двумя точками, обычно центром окуляра и центром объектива или зеркала. Обычно он направлен по центру трубки.
- 2. Отцентрируйте оптические компоненты на этой оси.** Если в телескопе элементов больше, чем объектив и окуляр, должна быть проведена хотя бы одна нетривиальная центровка. Иногда центрирование устанавливается на заводе и не регулируется пользователем телескопа.
- 3. Установите наклоны элементов.** Как правило, регулировка наклона должна выполняться в определенном порядке от одной из двух точек, определяющих ось, к другой точке. Плохой порядок значительно затрудняет выравнивание.
- 4. Повторите шаги 1, 2 и 3 в итеративном порядке.** Поскольку регулировки редко бывают полностью независимыми, один шаг выравнивания может нарушить ранее правильные настройки. Грубое выравнивание похоже на сгребание листьев. Первый проход не собирает каждый лист; это занимает несколько движений.

5. *Отрегулируйте только один элемент для точного выравнивания.* Точное выравнивание происходит по реальному изображению. Обычно небольшую настройку необходимо выполнить на том элементе, регулировка которого наиболее удобна.

Хотя это не является строго обязательным, вы можете сэкономить время и силы, воспользовавшись помощником для выравнивания. На всех телескопах, кроме самых компактных, коллимацию лучше всего выполнять двум людям: один сидит за окуляром, а другой выполняет настройку.

6.5.1 Ньютоновский отражатель

Наличие диагонального зеркала и множества сбивающих с толку отражений делают эту настройку самой сложной из трех, обсуждаемых здесь.

Прежде чем начать выравнивание, необходимо провести подготовку. Первый необходимый предмет — это центрированное смотровое отверстие. Этот пустой или безлинзовый «окуляр» имеет небольшое отверстие сзади вместо линзы. Назначение такого устройства – позволить однозначно расположить глаз на оси трубки фокусера. Менее очевидная цель — позволить вам видеть из места прямо в фокальной плоскости. Он закрывает обзор, если глаз не находится близко. Таким образом, глаз может располагаться не только в центре трубки фокусера, но и на правильном расстоянии от диагонали. Вы хотите разместить это смотровое отверстие рядом с фокальной плоскостью, когда телескоп сфокусирован на удаленных объектах.

Недорогим источником этих смотровых отверстий являются *прозрачный* пластиковые банки из-под пленки диаметром 35 мм с вырезанными доньшками и просверленным в крышке отверстием диаметром 3 мм. Обмотайте их несколькими витками ленты, чтобы они плотно прилегали.

Вторая подготовка — поместить точку маркера в геометрический центр зеркала. Стараясь случайно не коснуться поверхности зеркала, проложите по диаметру жесткую линейку. По линейке можно очень точно определить центр, а под прямым углом к нему — только прикидочно. В центре проведите короткую (3 мм) линию под прямым углом к прямому краю. Центр будет в каком-то месте вдоль направления этой короткой линии. Сделайте то же самое, повернув зеркало на четверть оборота. Посмотрите внимательно на центр. Вы должны увидеть две короткие линии, слегка смещенные, как показано на рис. 6-4. Истинный центр находится на пересечении этих двух линий, если их продлить до встречи. Это место, где нужно поставить точку.

Поначалу не беритесь за создание большой точки. Лучше всего сделать едва заметную отметку в этом месте и измерить ее обоими способами, чтобы убедиться, что это центр. Когда вы сделаете отметку большего размера, вам, вероятно, захочется расширить ее с одной стороны, чтобы исправить неизбежную ошибку. Эта точка может быть простой, например, перманентным черным маркером, или сложной, например, белой краской. (Некоторые люди утверждают, что белую точку легче увидеть, когда вы

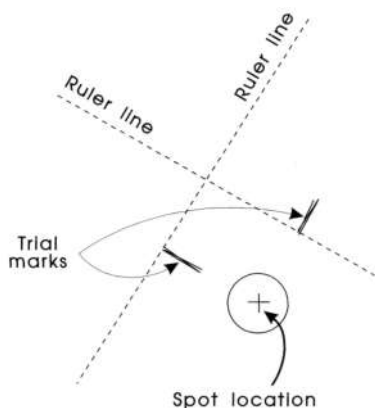


Рис. 6-4. Процедура завершения и обозначения истинного центра круглого диска.

пытаетесь выполнить выравнивание в темноте с помощью фонарика.) Сделайте точку достаточно большой, чтобы ее можно было легко увидеть (6 мм или 1/4 дюйма). Не беспокойтесь о том, что точки или короткие линии ухудшают оптическое качество. Отметины находятся в тени диагонального зеркала.

Шаги с 1 по 3 лучше всего выполнять в ярко освещенной комнате, освещенной рассеянным светом. (Идеально подойдет флуоресцентный свет.) Внутренняя часть трубы телескопа — не очень хорошо освещенное место. Во время грубой настройки заклейте внутри трубки напротив фокусера лист белой бумаги. Бумага обеспечит более светлый фон контура диагонального держателя, чем обычно затемненная внутренняя часть трубки.

Шаг 1: Установите осевую линию.

Ось будет проходить от центра поля зрения окуляра к центру зеркала. Этот шаг был бы тривиально простым, если бы он не зависел от разрыва под прямым углом, который происходит на диагонали. Когда диагональ выровнена, это будет легко проверить, но сейчас проверить невозможно. Вместо этого мы обращаем внимание на один решающий факт: необходимость того, чтобы фокусер скользил окуляром линейно вдоль оптической оси, обеспечивая тем самым, чтобы и ваш окуляр, и линза Барлоу находились на этой оси. Неправильная настройка Барлоу является катастрофой для тех, кто вынужден носить очки, поскольку окуляры Барлоу и окуляры средней кратности используются вместо окуляров с чрезвычайно короткой фокусировкой.

Будем считать, что оптическая ось будет проходить по центру трубки, а диагональ будет установлена точно на 45° . Проблема движения фокусера сводится к тому, чтобы фокусирующая трубка была направлена на центральную линию трубки и не наклонялась ни к одному из концов трубки. Если у вас есть

трубка аккуратно круглая и фокусер плотно к ней прилегает, волноваться наверное не стоит, но такие инструменты встречаются редко.

Я не могу дать инструкции по измерению наклона фокусера, потому что каждая ситуация индивидуальна. Я могу только указать на некоторые приемы, позволяющие усилить направление наклона. Первый — положить в фокусер что-нибудь помимо окуляра. Хороший выбор — длинная трубка такого же диаметра, как окуляр. Мы назовем его «длинным окуляром». Если вы выдвинете такую трубку за пределы фокусера, станет легко заметить, если она наклоняется к любому концу трубки. Сделайте прямоугольный шаблон из папки с файлами манильского формата или другого тонкого листа картона. Вырежьте угол настолько, чтобы он не касался оборудования фокусера, и приложите его к выступающей трубке. Любой наклон фокусера вдоль трубы зрительной трубы сразу становится заметен.

Удалите диагональ и выдвиньте длинный окуляр к центру трубы телескопа или как можно ближе. Посмотрите, не наклонен ли длинный окуляр в обе стороны от оси телескопа. Этот шаг особенно прост, если у вашего ньютоновца есть паук. Просто поместите указатель или винт в отверстие, из которого вы вынули диагональный держатель, и посмотрите на другой конец длинной трубки окуляра. Конечно, сначала отцентрируйте паука.

После того как вы убедились, что фокусер плотно прилегает к телескопу и выдвигает и убирает окуляры более или менее в запланированном направлении, вы готовы продолжить. Если посадка перекошена, перемещайте фокусер до тех пор, пока он не будет направлен точно в центр трубки.

Шаг 2: Отцентрируйте оптические компоненты по оси.

Поскольку ось будет проходить через центр зеркала и центр плоскости изображения, где бы они ни находились, «центрирование компонентов» означает центрирование диагонали вдоль этой линии. Помните, что диагональное размещение достигается без учета отражений. На этом этапе главное зеркало не обязательно должно находиться внутри прибора. Диагональ вполне могла бы представлять собой блок цемента. На самом деле полезно думать об этом как о нерефлективном. Вы должны подавить любое желание сосредоточить отражения, которые вы видите по диагонали. Это тебя сейчас не касается.

См. рис. 6-5. Эта диаграмма представляет собой идеально выровненный ньютоновский закон. (Фокусное соотношение было преувеличено, чтобы аномальное поведение было легко заметно.) Обратите внимание, что расстояние d_{near} больше, чем d_{far} . Выравнивание идеально по определению, но кажется, что диагональное зеркало не отцентрировано. Кажется, мы уже нарушили общее условие 2.

Главное, чтобы компоненты были *оптически* центрированы, а не физически центрированы. Когда вы посмотрите через маленькое смотровое отверстие, заменяющее

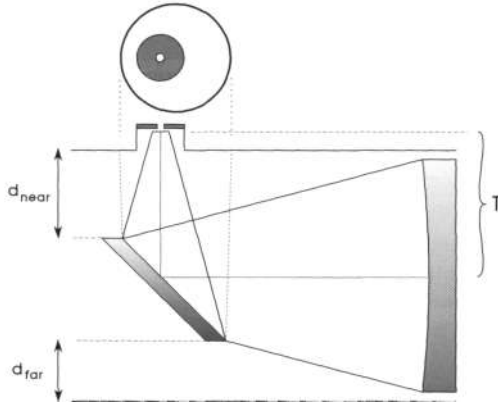


Рис. 6-5. Идеально выровненный ньютоновский телескоп с фокусным расстоянием около 1,75. Отображает центрированные и нецентрированные элементы.

окуляра, что ты видишь? Диагональ должна выглядеть как идеальный круг, аккуратно центрированный в нижней части трубки фокусера. Смещение вызвано перспективным ракурсом дальней стороны диагонали. Оно настолько далеко, что на самом деле кажется меньше. Вам нужно сдвинуть диагональ в сторону и вниз, чтобы отцентрировать ее на сходящемся конусе света. Вид через смотровое отверстие схематически показан на рис. 6-6.

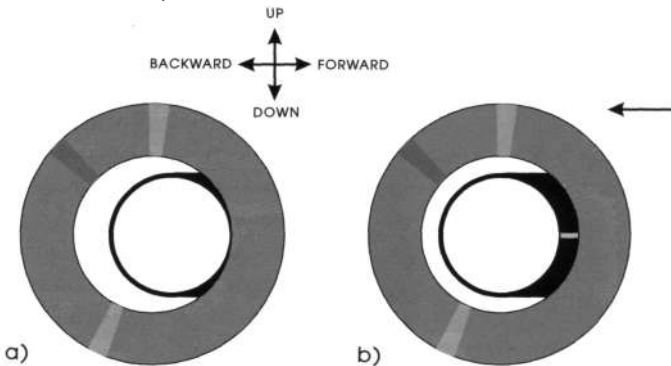


Рис. 6-6. Центрирование диагонали внизу трубки фокусера. (Эта трубка изображена в виде темного кольца снаружи с серыми радиальными полосами внутри него.) а) Неправильно установленная диагональ, б) Правильное положение в результате смещения назад держателя диагонали. Поперек трубки прикрепляется легкий лист бумаги.

Величина прямого смещения определяется методом проб и ошибок. Переместите диагональ вперед и назад, пока она **показывается** центрирована. Обратите внимание, что в этом утверждении слово «показывается» выделено ударением. Поскольку суждение может быть затруднено, у вас может возникнуть соблазн убрать смотровое отверстие и посмотреть.

вдоль трубки фокусера под углом скольжения. Тогда вы неправильно сравните переднюю и заднюю стороны и неправильно выставите диагональ. Правильный метод — смотреть на него из центра и перемещать диагональ до тех пор, пока он не станет только *выглядит* центрировано.

Вы можете обнаружить ошибку в направлении «вверх-вниз», как показано на рис. 6-6. Эта ошибка, вероятно, вызвана незамеченным наклоном фокусера или боковым смещением крестовины. Отрегулируйте его, подставив фокусер или переместив крестовину, прежде чем продолжить. На рисунке 6-6b показана правильно центрированная диагональ.

О величине смещения диагонали от окуляра невозможно судить, просто взглянув. Его необходимо рассчитывать и измерять до тех пор, пока величины *Д* *около* и *Д* *далеко* верны. Это смещение можно напрямую рассчитать с помощью аналитической геометрии. (Такой вывод приведен в Приложении С.) Вот ответ и несколько простых приближений:

Если *Д* диаметр зеркала, *Л* диаметр поля 100% освещенности, *T* расстояние от центра трубки до фокальной плоскости, *ж* фокусное расстояние и *с* сагитта зеркальной поверхности ($c = D^2/16ж$), тогда смещение

$$\text{Компенсировать} = \frac{T \cdot \text{Нидерланды}^2}{1 - H^2} - T \quad \text{где} \quad H = \frac{D - L}{2(j - c)} \quad (6.2)$$

Для очень маленького поля 100% освещенности и неглубокого зеркала это примерно.

$$\text{Компенсировать} = \frac{T}{4\phi^2} \quad (6.3)$$

где *F* — фокусное расстояние.

Предположим, у вас есть две равные стопки монет. Если вы уберете одну монету и положите ее в другую стопку, стопки будут различаться по высоте на две монеты. По той же причине *Д* *около* больше, чем *Д* *далеко* в два раза больше смещения. Ряд оценок для *Д* *около* - *Д* *далеко* перечислены в Таблице 6-1. Эти типичные смещения генерируются с использованием уравнения 6.2 с разумными оценками *T*.

При больших фокусных расстояниях смещение очень мало, поэтому использование этой таблицы должно быть критичным только в ее левом нижнем углу — для быстрых и больших зеркал. По этой причине аппроксимация в уравнении 6.3 более чем достаточно. В идеале быстрые ньютоновцы должны проектироваться с очень маленькими областями полного освещения в фокальной плоскости (Питерс и Пайк, 1977).

Большинство крестовин можно отрегулировать так, чтобы можно было намеренно сместить диагональ, просто изменив регулировку их крепежных винтов. Не беспокойтесь, если лопасти на противоположных сторонах диагонали не совмещены точно. Это условие лишь изменяет картину дифракции паука. Количество света, рассеиваемого пауком, такое же, как и раньше. В некотором смысле, в некоторых условиях наблюдения паутиная дифракционная картина с 8 менее яркими пиками может быть лучше, чем с 4 сильными.

Таблица 6-1
Разница между двумя измерениями из трубки
до края диагонали, *Докло*—*Далеко*"="2 Смещение
Поле 100% освещенности равно нулю.

Диаметр (дюймы)	T	Фокальное соотношение							
		4	4,5	5	6	7	8	10	
3	3,5	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,09	0,02
4.25	4.4	0,14	0,11	0,06	0,04	0,03	0,11	0,08	0,02
6	5,6	0,18	0,14	0,06	0,04	0,14	0,10	0,07	0,03
8	7,0	0,22	0,17	0,05	0,17	0,12	0,09	0,07	0,04
10	8.4	0,26	0,21	0,20	0,14	0,10	0,08	0,23	0,04
12,5	10.2	0,32	0,25	0,16	0,12	0,09	0,25	0,18	0,05
14.25	11.4	0,36	0,28	0,13	0,10	0,27	0,19	0,14	0,06
16	12,6	0,39	0,31	0,11	0,31	0,21	0,16	0,12	0,06
17,5	13,6	0,43	0,34	0,36	0,25	0,19	0,14		0,07
20	15,4	0,48	0,38						0,08
24	18,2	0,57	0,45						0,09

Диаметр (мм)	T	Фокальное соотношение							
		4	4,5	5	6	7	8	10	
75	90	2,8	2,2	1,8	1,2	0,9	0,7		0,4
110	110	3,5	2,7	2,2	1,5	1,1	0,9		0,6
150	140	4,4	3,5	2,8	2,0	1,5	1,1	0,7	
200	180	5,6	4,4	3,6	2,5	1,8	1,4	0,9	
250	210	6,7	5,3	4,3	3,0	2,2	1,7	1,1	
320	260	8,1	6,4	5,2	3,6	2,6	2,0	1,3	
360	290	9,0	7,1	5,8	4,0	2,9	2,3	1,4	
400	320	10,0	7,9	6,4	4,4	3,3	2,5	1,6	
450	350	10,8	8,6	6,9	4,8	3,5	2,7	1,7	
500	390	12,2	9,7	7,8	5,4	4,0			3,1
600	460	14,4	11,4	9,2	6,4	4,7	3,6	2,3	2,0

Шаг 3: Установите наклон элементов.

Как только вы визуальнo отцентрируете диагональ в трубке фокусера и сместите необходимое расстояние, вы готовы к регулировке наклона. Если бы вы сначала тщательно отрегулировали наклон главного зеркала, настройка не сработала бы, когда диагональ будет окончательно отрегулирована. Таким образом, наклон диагонали необходимо зафиксировать до прикосновения к основному зеркалу.

На этом этапе представьте, что главное зеркало окрашено в белый цвет. Все, что вы можете увидеть на основной камере, — это выступающие на ее поверхность зеркальные зажимы. Не обращайте внимания на любые отражения. Полезный трюк — болезненно осознавать пыль на зеркале. Сосредоточьтесь на пыли и зажимах зеркала. Смотреть *в* зеркало, не *через* его. На рисунке 6-7а показана диагональ с неправильным наклоном.

Поворачивайте диагональный держатель в крестовине до тех пор, пока он не станет выглядеть так, как показано на рис. 6-7б. Затем отрегулируйте винт в основании держателя, который наклоняет диагональ к глазу или от него, чтобы центрировать зажимы главного зеркала, как показано на рис. 6-7с. Большинство оснований диагональных держателей не содержат пружин. Если вы ослабите один винт, вам придется затянуть два других.

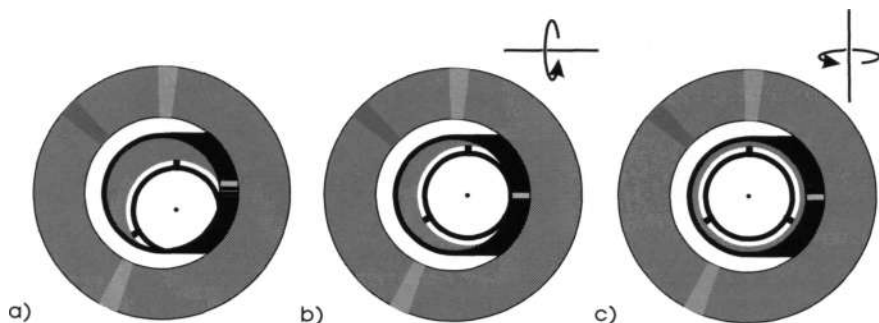


Рис. 6-7. Установка угла диагонали: а) Не выровненная диагональ, б) После вращения диагонали в крестовине, в) После наклона диагонали с помощью винтов в основании.

Как ни странно, две наиболее распространенные регулировки — это вращение всей диагонали вокруг своей оси и регулировка только одного винта в основании. Вы можете спросить, почему у диагональных оснований есть три надоедливых и труднодоступных винта. Подпружиненный шарнир и один регулировочный винт имеют больше смысла. Одно из объяснений состоит в том, что производители телескопов крайне консервативны, а диагонали уже давно крепятся тремя винтами.

В приведенном выше описании были устранены все неправильные повороты и разочарования. На первый взгляд кажется невозможным выполнить эти регулировки, чтобы одновременно добиться выравнивания диагонали и сохранить герметичность разъемов. Когда гаечный ключ вращается на шпинделе, предотвратить диагональное вращение особенно сложно. Пятнадцать минут тщательной работы могут быть потеряны, пока вы будете пытаться надежно закрутить диагональ на место. В конечном итоге вы научитесь прогнозировать эффект гаечного ключа. В конечном итоге вы будете знать, насколько далеко следует сместить выравнивание, затянутое вручную, чтобы добиться выравнивания с затягиванием гаечным ключом.

Последняя задача грубой коллимации — настройка наклона главного зеркала. Наконец, вы можете рассмотреть отражение в первичной. Маленькая дырочка, через которую вы смотрите, отражается где-то рядом с зеркальной точкой. Регулируя винты на задней стороне главного зеркала, переместите отражение отверстия так, чтобы оно оказалось за точкой. Не тратьте много усилий на доработку этой настройки. Вы установите его опытным путем с помощью звездного теста.

На рис. 6-8а показан пример смещенного главного зеркала. На рис. 6-8б показано правильное грубое выравнивание. Короткая стрелка показывает направление отражения от основания фокуса.

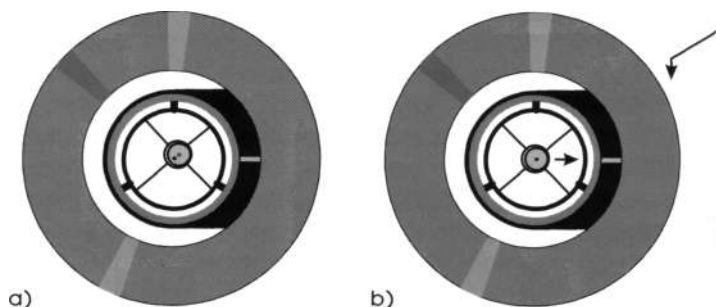


Рис. 6-8. При совмещении диагонали винты на задней стороне главного зеркала регулируют до тех пор, пока точка не наложится на визирное отверстие: а) исходный вид, б) правильное грубое выравнивание после перемещения отражения отверстия указанным способом.

Шаг 4. Повторите шаги 1, 2 и 3 в итеративном порядке.

Вам, безусловно, разрешено начать этот процесс заново, чтобы исправить любые трудности. Не забудьте правильно расположить шаги. Не корректируйте случайно, даже если у вас очень большое искушение. Хорошим примером такого искушения является децентрированное появление второго отражения на диагоналях рис. 6-5 и 6-8б. Помните, эти системы правильно выровнены, но отражение нижней части фокусера все равно децентрировано, что особенно сильно проявляется в светосильных зеркалах с большой диагональю.

Когда они впервые замечают эту децентрацию, многие начинающие коллиматоры телескопов начинают дергать диагональ и в конечном итоге разрушают с трудом завоеванную грубую юстировку. Людям необычно беспокоит такая децентрация, и они часто искажают выравнивание до тех пор, пока эти круги тоже не станут примерно концентрическими.

К сожалению, эта ошибка имеет тот же эффект, что и перекос фокусера и, как следствие, наклон фокальной плоскости. Окуляр больше не перемещается вдоль оптической оси. Качество линзы Барлоу может ухудшиться, а края кадров фотопленки станут нечеткими и размытыми. Из-за естественной кривизны поля в ньютоновских рефлекторах одна сторона кадра сильно не в фокусе, а другая — нет. (Действительно, такое фотографическое поведение можно использовать для диагностики наклона фокальной плоскости.)

Предположительно, Рис. 6-5 идеально выровнен. Почему же тогда телескоп в идеальной коллимации должен когда-либо проявлять какую-либо форму децентрации? Проблема в трех отражениях, которые возникают, когда вы смотрите в телескоп таким образом. Обычный путь света — это одно отражение от первичной обмотки и одно отражение от диагонали. Когда мы смотрим в телескоп назад, путь представляет собой одно отражение от диагонали, второе отражение от главного зеркала (пока все в порядке) и *а третья отражение от диагонали*. Мы должны

ожидайте центрирования только до главного зеркала на рис. 6-8б. Ни диагональ, отраженная в главном зеркале, ни нижняя часть трубки фокусера, дважды отраженная от диагонали, не должны быть центрированы.

Одно изменение следует внести, когда вас устраивает грубая настройка инструмента. Раскрутите лопасти паука так, чтобы они снова оказались перпендикулярны главному зеркалу. Этот шаг лучше всего выполнять аккуратно с помощью серповидного ключа с узкими браншами. Поддерживайте лопасть посередине или немного ближе к трубке. Посмотрите в смотровое отверстие и поворачивайте паука, пока он не станет самым узким. Это гарантирует, что засорение крестовины вызовет как можно меньше засоров.

Шаг 5: Отрегулируйте точное выравнивание только одного элемента.

Точно выровняйте по звезде. Используйте привычную конфигурацию для большого увеличения. Если вы обычно используете линзу Барлоу, включите ее в оптический комплект. Вам следует больше заботиться о попадании в ось Барлоу, чем о достижении хорошего выравнивания точек. Выберите умеренно яркую звезду высокого возвышения и отцентрируйте ее на поле зрения. Выдвигайте или вставляйте фокусер до тех пор, пока абберрация дефокусировки не составит около 10 длин волн. Если телескоп сильно смещен, вы увидите что-то вроде рис. 6-9d. Такая закономерность маловероятна, если грубое выравнивание было выполнено тщательно. В нашем примере смещение в 12 угловых минут означает, что отражение смотрового отверстия смещено от центра на 4 мм или сразу за пределы точки. (Подумайте, насколько плохим должно было быть выравнивание до того, как вы начали.)

Модель, используемая для создания этих шаблонов, несколько неадекватна. В расчетах препятствие по-прежнему находится в центре, но оно не центрировано в реальном смещенном отражателе. Смещение вторичной тени вбок немного усиливает внешний фокус и уменьшает внутренний фокус.

Скорее всего, вы увидите менее искаженные узоры, как на рис. 6-9с или рис. 6-9b, которые являются примерами более легкого несоосности. В этих случаях картину рис. 6-9b трудно отличить от идеальной, если она расфокусирована до 10 длин волн. Выберите более тусклую звезду и расфокусируйте ее на меньшую величину. Должно появиться что-то вроде изображений на рис. 6-10. Если зрение отличное, вы можете выполнить последнюю критическую настройку сфокусированной звезды. К сожалению, зрение редко бывает достаточно хорошим для этого. Утешайтесь осознанием того, что если турбулентность настолько сильна, что затрудняет выравнивание по звездному тесту, то видимость, вероятно, является ограничивающим фактором в вашей шаткой стопке фильтров.

Оптическая ось на всех рисунках расположена далеко справа от рисунка. Вам нужно переместить эту ось обратно в центр поля, поэтому вы хотите переместить изображение *влево*. Реальная ситуация не будет такой благоприятной. Вспышку комы можно направить под любым углом. Вы должны быть в состоянии каким-то образом,

вниз. Установка небольших телескопов поздним вечером, когда достаточно времени для достижения температуры окружающей среды, часто бывает достаточной для устранения этой оптической проблемы.

Единственные наблюдатели, которые могут найти токи в трубке одновременно нежелательными и постоянными, — это те, кто использует большие или особенно толстые объективы телескопа. Однажды я работал над 16-дюймовым ньютоновским зеркалом и толщиной 3 дюйма (соотношение 1:5). Этому зеркалу потребовалось полночи, чтобы остыть даже в относительно благоприятных условиях. Многие ночи оно так и не остывало, но когда охлаждалось, зеркало работало великолепно.

Такие зеркала действительно следует подготовить до того, как они потребуются для наблюдения. Перевозка в теплом автомобиле – одно из худших дел, которые можно сделать с толстым зеркалом. Почти одинаково вредно хранение в освещенном солнцем сарае или обсерватории. Оптимальная процедура — открыть телескоп или обсерваторию ранним вечером, задолго до того, как инструмент понадобится. Если телескоп перевозится, старайтесь не перевозить его в отапливаемом салоне автомобиля. Вместо этого перевозите его в прицепе или в кузове грузовика.

Иногда телескоп приходится устанавливать на бетоне или асфальте. Даже при правильно стабилизированном приборе трубка может улавливать внешние токи и действовать для них как канал. В таких ситуациях попробуйте закрыть нижний конец ньютоновской трубки полиэтиленовым пакетом и посмотреть, уменьшится ли абберрация.

Глава 8

Защемленная и деформированная оптика

В начале каждого сеанса наблюдений вам следует начать проверку на наличие проблем, которые могут возникнуть при транспортировке телескопа или переустановке оптики после технического обслуживания. В этой главе будет обсуждаться модель звездного теста, характерная для одного из таких искажений, и представлены способы снятия необычных нагрузок на оптику. Помимо улучшения изображения, если уделять пристальное внимание деформациям, вы можете избежать катастрофических повреждений. Трещины по краям часто встречаются среди зеркал со слишком тугими зажимами по краям. Я видел одно зеркало, которое было настолько сильно деформировано, что сломалось пополам.

8.1 Причины

Представьте себе зеркало или линзу в виде толстого круглого куска желатина. Поскольку мы обычно не замечаем крошечных деформаций, мы считаем некоторые материалы жесткими, но все объекты деформируются под воздействием изменений давления и температуры. Объект, который кажется твердым для неизмеренного зрения и осязания, становится мягким и податливым, когда мы смотрим на изменения размером с длину волны света. Оптика жесткая только в макроскопическом смысле.

Если мы поместим желатин на три опорные точки, форма искажения поверхности станет сложной функцией толщины пластины и расположения этих опор. Проблема усложнится, если мы наклоним желатин; разные опоры несут неравную долю веса. Видно, что края между точками опоры провисают.

Опоры внизу можно разместить рядом с краями, что приведет к провисанию центра, или рядом с центром, что приведет к прогибу края. Их можно разместить на 70% радиуса, что вызывает наименьшую деформацию, но более сложную. Мы можем разделить каждую опору на 3 или 6, но на какие компромиссы нам придется пойти?

Это касается только платформы. А что насчет краев? Если мы прикрутим крайние опоры слишком сильно, поверхность сдавится в трех положениях опор. Зажимы можно правильно отрегулировать, но когда телескоп кренился, один из зажимов может оказать необычное давление из-за веса плиты. Краевую установку можно решить несколькими способами: от элегантно простого метода подвешивания с помощью ремня, используемого в креплениях Добсона, до ртутного краевого мешка, используемого в нескольких больших экваториальных рефлекторах.

Однако механическое проектирование телескопа выходит далеко за рамки данной работы. Будет представлен только один пример деформации поверхности. Деформации поверхности вызывают бесконечное разнообразие моделей звездных испытаний, ни одна из которых не похожа на другие. Они могут иметь некоторые из следующих характеристик:

1. Их можно отличить от турбулентности, поскольку они представляют собой фиксированные закономерности.
2. Они часто демонстрируют 2-, 3- или 6-кратную симметрию.
3. Они обычно слабее на больших высотах телескопа, чем на низких.
4. Искажения рисунка могут инвертироваться при прохождении фокуса.

Хотя защемление оптики чаще встречается в рефлекторах, оно встречается и в рефракторах. У одного рефрактора, который я исследовал, возникла проблема с связующим веществом, используемым между линзовым элементом. Материал затвердел или сгруппировался в трех местах, образуя звездный образец, похожий на классическую ячейку с трехточечным защемленным зеркалом. См. рис. 8-1.



Рис. 8-1. Картина звездного теста, снятая через большой рефрактор. Его трехсторонняя симметрия выдает зажимающий эффект. При устранении этой проблемы производитель сообщил, что оптический связующий агент оказывает чрезмерное давление на линзу..

Кроме того, ячейки линз должны быть немного больше, чем элементы линз, чтобы учесть более сильную усадку металла при более низких температурах. Стекло сжимается, но не так сильно, как металл. Если ячейка будет сделана слишком маленькой, оптика может фактически сжаться при низких температурах, что приведет к астигматическому или иному искажению изображения. Если температура упадет слишком низко, плотная клетка может треснуть хрусталик, как яйцо.

8.2 Функция аберрации

Существует столько же форм деформации поверхности, сколько существует оптических поверхностей, но здесь будет смоделирована только одна. Произвольным выбором будет зажим или, возможно, тонкое зеркало со слишком малым количеством нижних опор. Какими характеристиками должна обладать модель, чтобы имитировать эффекты тугих зажимов зеркала? Прежде всего, он должен быть самым сильным у края. Если оптика деформируется, легче всего это сделать на краю. Во-вторых, аберрационная функция должна иметь трехстороннюю симметрию. Оптика, конечно, может деформироваться и по-другому, кроме трехлепестковой схемы. Однако, поскольку монтажные ячейки обычно имеют трехстороннюю форму, такая деформация является обычным явлением.

Без физического обоснования можно выбрать смягченную циклоидальную зависимость по углу и радиальная зависимость третьего порядка, что дает функцию аберрации, показанную на рис. 8-2. Привлекательной особенностью этой функции зрачка является асимметрия деформации; он варьируется от складок в долине до горб с плоской вершиной. Аберрационная функция могла бы быть сделана симметричной по впадинам и пикам, что-то вроде «трехлепесткового» астигматизма, но астигматическое поведение мы увидим позже, поэтому останавливаться на нем здесь было бы излишним.

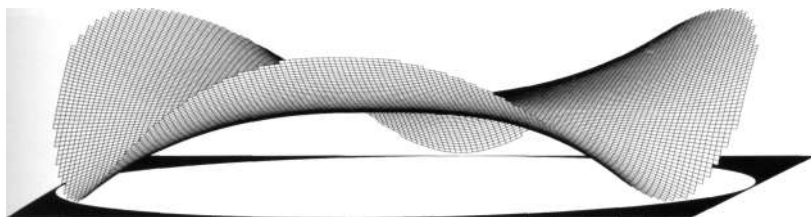


Рис. 8-2. Аберрационная функция пережатой или деформированной оптики.

8.3. Фильтрация заземленной оптики.

На рисунке 8-3 показаны передаточные функции модуляции двух систем с заземлением без препятствий. Поскольку функция зрачка не является строго симметричной, перенос варьируется в зависимости от угла, под которым мы размещаем линии цели MTF. На рисунке показаны три передаточные функции, соответствующие полоскам под вертикальным, горизонтальным и углом 45°. MTF для этой конкретной поверхностной деформации очень похож на MTF для дефокусировки.

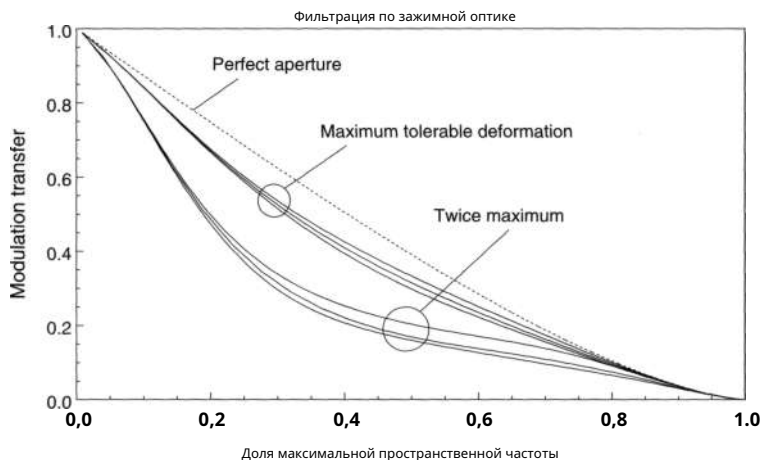


Рис. 8-3. Дegrадация MTF для трехлепестковой деформированной оптики.

Наименее защемленные кривые на рис. 8-3 дают коэффициент Штреля 0,8 (тот же, что и 1). Ошибка сферической аберрации на 4 длины волны). Однако из-за особенностей этой аберрационной функции общая пинч-абerrация составляет 0,4 длины волны.

При удвоении общей аберрации до 0,8 длины волны кривая вытягивается еще дальше вниз. На низких пространственных частотах такой телескоп сохраняет контраст примерно так же, как и идеальную апертуру в 60% диаметра.

8.4. Дифракционные картины защемленной оптики.

На рис. 8-4 мы видим картины звездных испытаний, ожидаемые от искривленного телескопа-рефлектора с 25% центральным препятствием. В фокусе дифракционные кольца сжимаются в узловые радиальные шипы.

Такие идеально сбалансированные структуры, вероятно, не будут видны в настоящие телескопы. Одна точка давления редко вызывает точно такую же аберрацию, как любая другая. Кроме того, каждая деформированная поверхность будет проявлять свои уникальные свойства. Одна сложная закономерность, не учитываемая этой моделью, — это шестигранный выступ с одной стороны фокуса и приглушенная многоугольная форма с другой. Я стал свидетелем этой проблемы много лет назад, когда зеркало было слишком плотно ввернуто в 9-точечную ячейку.

Тем не менее, эту проблему легко диагностировать, используя характеристики, упомянутые выше:

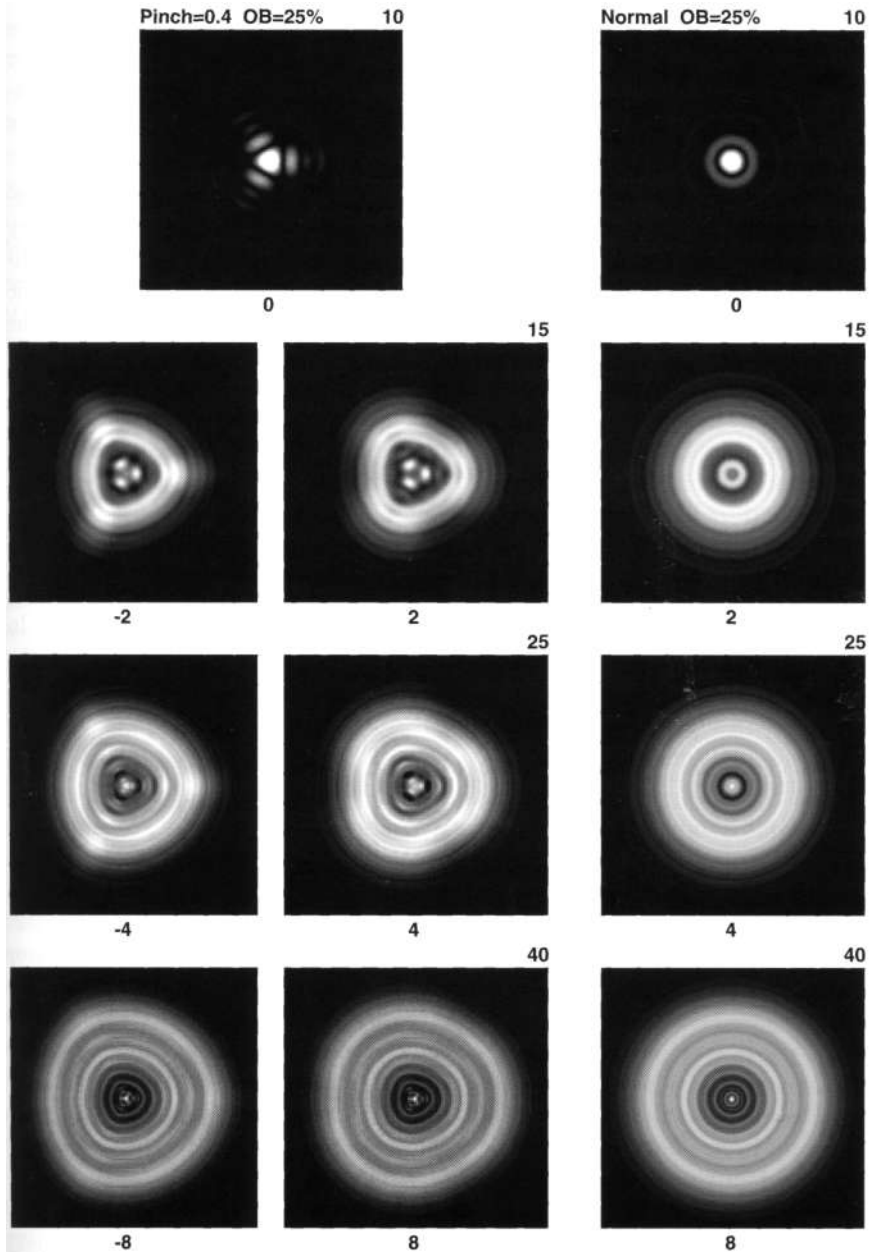


Рис. 8-4. Звездный тест: появление деформированной или заземленной апертуры с общей абберацией 0,4 длины волны. Нормальное поведение указано в столбце справа. Обструкция составляет 25%.

1. *Посмотрите, изменится ли деформация со временем.* Если это фиксированное, неизменное искажение изображения, оно не может быть вызвано местным нагревом, токами в трубке или атмосферными воздействиями. Посмотрите еще раз через 15 минут. Воздушная оптика кардинально меняется; заземления нет (если только сжатие заметно не меняется с температурой).
2. *Посчитайте точки по периметру.* Если насчитать 3 или 6, то, скорее всего, виноваты механические опоры. Трех- или шестикратная симметрия не так часто притирается к стеклу. Двукратная симметрия указывает на давление с одного направления или же это может быть настоящая астигматическая ошибка в стекле. Если обнаружена двукратная асимметрия, попробуйте определить ось астигматизма, поместив руку в луч так же, как вы это делали при юстировке. Если ось деформации строго вертикальна, обычно можно предположить, что либо вам невероятно не повезло, либо астигматизм является результатом воздействия гравитационных сил, оказывающих неравномерное давление.²
3. *Переместите телескоп, чтобы посмотреть на звезду вблизи зенита.* Самое простое подтверждение того, что ваша трудность вызвана механическими опорами, — это просто изменить направление силы, действующей на оптику. Если деформация уменьшается или изменяется, это может означать, что опоры деформируют диск. В любом случае, редко можно не изменить хотя бы величину, если не характер, деформации, просто изменив угол телескопа. Исключением является защемленная пластина корректора Шмидта-Кассегрена. Поскольку пластина удерживается так прочно, она дает одинаковое искаженное изображение под любым углом.
4. *Стойка через фокус.* Некоторые искаженные модели звездного теста похожи на астигматизм на противоположных сторонах фокуса. Если «точки» изображения с одной стороны становятся плоскими областями с другой, возможно, что-то напрягает оптику. Однако другие деформации не демонстрируют такого поведения. На рис. 8-4 он не показан, поэтому не всегда является надежным индикатором заземления.

8.5 Устранение проблемы

В оставшейся части обсуждения предполагается, что у вас телескоп-рефлектор с плохой оптикой. Такая проблема в рефракторах встречается редко, и с ней все равно мало что можно сделать, кроме как вернуть объектив производителю для обслуживания.

Если вы видите двухлепестковое искажение изображения в ньютоновском рефлекторе, у вас может быть астигматизм либо в главном зеркале, либо в диагонали. Тебе нужно

²См. главу 14.

простой способ изолировать проблему от проблемного зеркала. Поверните трубку на 20° — 30° . Если кажется, что деформация зафиксирована в окуляре под тем же углом, проблема, вероятно, заключается в диагонали, поскольку она тоже вращается. С другой стороны, сила тяжести изменила свое направление по отношению к трубке. Если кажется, что узор повернулся на тот же угол или изменился каким-либо другим образом, возможно, он находится в опорах главного зеркала.

В настоящее время телескопы, которые часто подвергаются наибольшей опасности из-за искаженной оптики, представляют собой большие ньютоновские рефлекторы с тонкими зеркалами. Во многих таких инструментах угол трубки нельзя изменить, поэтому вы не можете изолировать причину аберрации простым вращением трубки. К счастью, картина, видимая в отражателях с тонкими зеркалами, должна резко меняться с высотой. Попробуйте сравнить вид расфокусированной звезды прямо над горизонтом с звездой, расположенной почти над головой. Если внешний вид заметно меняется, наиболее подозрительной опорой является та, на которую приходится наибольший вес, — главное зеркало.

Если телескоп поврежден деформацией, лучше попытаться отремонтировать зеркальную ячейку вслепую, чем ничего не делать. Во-первых, вы должны убедиться, что зажимы зеркала не давят на поверхность. В идеале зеркала такими ограничителями даже не удерживаются. Целью зажимов для зеркала является предотвращение катастрофических повреждений во время транспортировки и хранения, поскольку они действуют как упоры, предотвращающие падение зеркала в трубку лицевой стороной вниз. Когда телескоп находится в рабочем состоянии, эти зажимы должны висеть над поверхностью.

Следует убедиться, что боковые опоры слегка ослаблены. Во многих зеркальных ячейках зажимы и боковые опоры представляют собой одни и те же узлы. Поскольку большинство зеркальных ячеек рассчитаны на зеркало номинального размера, боковые опоры можно регулировать либо с помощью пластикового установочного винта, либо путем добавления тонких прокладок к креплению зажима.

Чего следует избегать, так это ситуации, когда зеркало удерживается под действием чрезмерной силы, отличной от собственного веса. В одной зеркальной ячейке, которую я проверял несколько лет назад, из комбинированного зажима и краевых опор было снято слишком много регулировочных шайб. Этот зажим был прикреплен винтом, и зеркало остановило винт раньше, чем это сделал металл ячейки. По сути, владелец затягивал боковую часть зеркала гаечным ключом.

Если зеркало немного дребезжит при встряхивании ячейки, значит, оно установлено правильно. Постарайтесь сделать перемещение менее 1 мм в любом направлении и еще меньшее вертикальное перемещение.

Тонкие и большие зеркала в альтазимутальной оправе Добсона не должны удерживаться по краям точечными ограничителями. Их собственный вес вызывает неприемлемый стресс. Тонкие зеркала следует вешать на ремешке. Но даже если ваше зеркало удерживается ремнем, оно все равно может быть плохо отрегулировано. В одном телескопе, который я видел, ремень соскользнул, и зеркало оказалось на боковой стороне коробки. Кроме того, ремень никогда не должен поддерживать более 50% окружности зеркала.

за углом или держите зеркало слишком крепко. Некоторые зеркала крепятся с помощью ремня, который затягивается винтом, похожим на автомобильный хомут для шланга радиатора. Такие способы крепления следует заменить или модифицировать, поскольку они чрезмерно сжимают зеркало.

Конечно, существует мало приемлемых конструкций ячеек для больших тонких зеркал, закрепленных на экваториальной монтировке. Когда инструмент движется по небу, он также совершает вращательное движение. Таким образом, направление силы тяжести меняет ориентацию относительно клетки. Помимо упомянутого ранее раствора с ртутным мешком,³ производители испробовали множество других уловок, чтобы избежать чрезмерного давления в крайних точках. Самый распространенный из них — приклеить зеркало к нижним опорам, полностью отказавшись от краевых держателей и зажимов. Даже гибкий аквариумный цемент иногда сталкивается с проблемами. Приклеивание зеркала таким образом открывает возможность воздействия других давлений со стороны деформированных монтажных пластин. Возможно, вам удастся настроить такое зеркало для правильной работы в некоторых участках неба, но, скорее всего, вам придется смириться хотя бы с небольшим искажением. Компромиссы иногда неизбежны при выборе установки такого большого гибкого зеркала в экваториальном направлении.

³В этом методе используется большое количество токсичной ртути, и эту процедуру могут безопасно использовать только профессионалы.

Глава 9

Препятствие и затенение

Изменение пропускания апертурного зрачка приводит к изменению дифракционной картины. Препятствие и затененное пропускание не являются деформациями волнового фронта в том же смысле, что и аберрации. Они могут возникать в официально «идеальных» апертурах. Тем не менее, они могут аналогичным образом влиять на воспринимаемое качество изображения.

В этой главе выделено пять основных моментов:

1. Центральные препятствия размером менее 20% апертуры на практике неотличимы от свободной апертуры, а для препятствий размером менее 25% эффективность может быть очень хорошей.
2. Безрассудные попытки уменьшить центральную обструкцию могут привести к получению даже худших изображений, чем те, которые возникают в результате обструкции.
3. Паук перед апертурой портит изображение только для тусклых объектов рядом с яркими источниками помех или для малоконтрастных объектов, находящихся в расширенном поле зрения. Для большинства наблюдений в темном поле эффект паука носит лишь косметический характер.
4. Затемнение внешней части апертуры приводит к улучшению контрастности на низких пространственных частотах, но только за счет высоких пространственных частот.
5. Пыль и царапины — это косметические ошибки, аналогичные паутинной дифракции, за исключением некоторых видов наблюдений.

9.1 Центральное препятствие

Самый очевидный и потенциально самый опасный вид изменения трансмиссии вызван центральным диагональным или вторичным зеркалом.

Некоторые наблюдатели почти фанатично относятся к центральной преграде. В различных астрономических публикациях они делали общие заявления, такие как «препятствие уменьшает контраст», не указывая при этом пространственные частоты, на которых происходит это уменьшение. Они подразумевают, что препятствия настолько серьезно наносят ущерб имиджу, что нельзя мириться с какими-либо суммами.

Однако негативные последствия центральной обструкции можно легко и точно рассчитать. Мы увидим, что они значительно ухудшаются за пределами частичной обструкции в 20–25% апертуры. Пока препятствие находится внутри этой фракции, изображение очень близко к изображению в телескоп без препятствий.

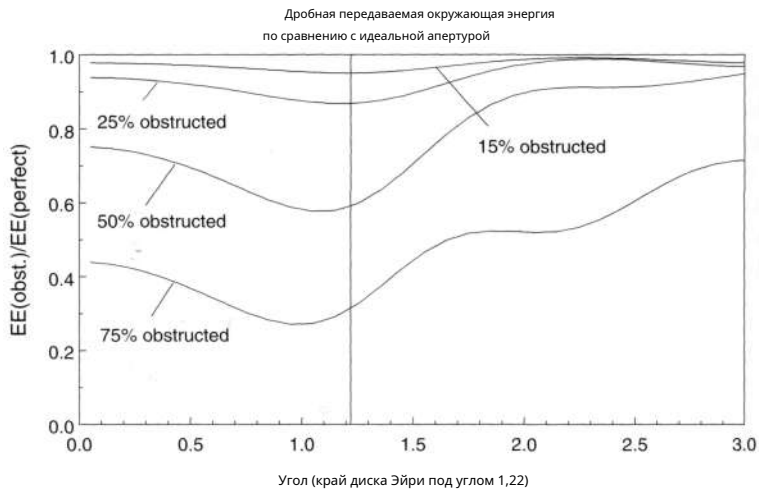


Рис. 9-1. Переданная окружающая энергия центрально закрытых апертур, деленная на окружающую энергию свободной апертуры (позже названная коэффициентом окружающей энергии, или EER). Производительность резко падает при 20-25% обструкции.

Рисунок 9-1 иллюстрирует не контраст, а тесно связанную с ним тему окружающей энергии. На рис. 9-1 нормализованная энергия окружения закрытых апертур разделена на нормализованную энергию идеальной круглой апертуры. Таким образом, светосилы с препятствиями отклоняются от идеального значения, равного единице.

Когда окружность приближается к радиусу свободного диска Эйри, равному 1,22, эти отношения падают. Размер пятна меньше в инструментах с препятствиями, и энергия, отнятая у основного дифракционного пятна, в основном осаждается в первых одном или двух дифракционных кольцах. Хотя затрудненный узор пересекает минимум между центральным диском и первым кольцом, он содержит мало дополнительной энергии, и свободный узор опережает его. Нет

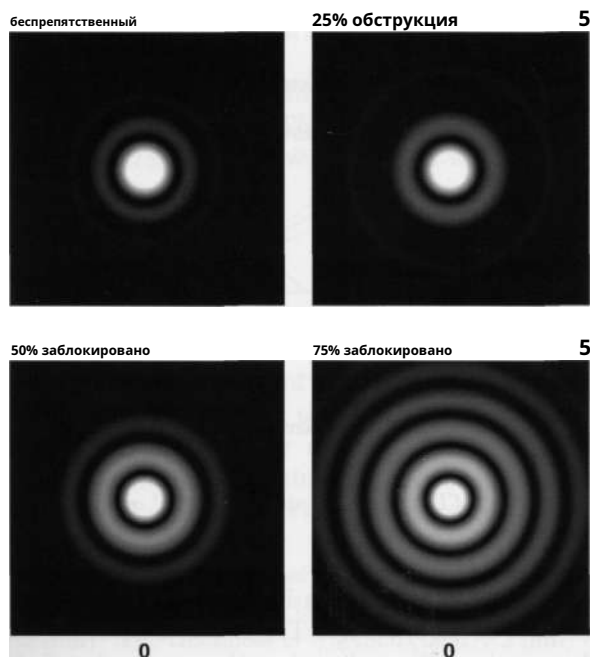


Рис. 9-2. Сфокусированные дифракционные картины, возникающие в результате центрального препятствия.

пока круг не охватит первые кольца обоих узоров, соотношение начнет восстанавливаться.

На сфокусированных дифрактограммах, показанных на рис. 9-2, интенсивность колец увеличивается по мере увеличения препятствия. К тому времени, когда обструкция достигает 75%, все претензии на оптическое качество теряются. Парадоксально, но дифракционный диск меньше. Все эти изображения рассчитаны в одном масштабе и напечатаны с одинаковой центральной интенсивностью, поэтому такое сжатие нельзя объяснить артефактом репродукции. Это явление реально. Фактически, самый узкий центральный диск находится в апертуре, которая почти полностью закрыта, но мощные кольца, образующиеся в такой апертуре, делают его бесполезным для получения точных изображений.

Фильтрация представлена на рис. 9-3. Опять же, низ не пропадает на средних частотах, пока засор не превысит 25%. Диаметр препятствия менее 20% апертуры можно считать приемлемо малым. Уменьшение размера пятна проявляется в увеличении ФПМ на высоких пространственных частотах; контраст здесь превышает даже значение для идеальной диафрагмы.

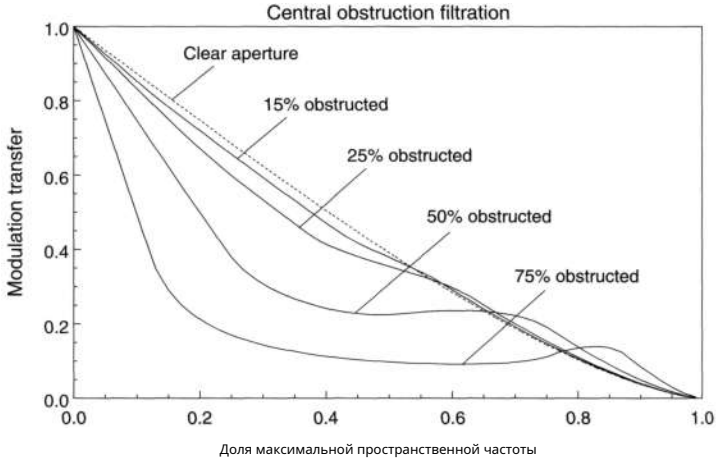


Рис. 9-3. Кривые МТФ простых центральных препятствий.

Эти кривые показывают, что небольшая передышка доступна между 20% и 25% апертуры. Негативные последствия центральной обструкции начали проявляться, но всю свою ярость они приберегают для обструкции выше 30%. Любая апертура, закрытая на 25%, может быть очень хорошей, а телескопы, закрывающие 20% диаметра, могут быть превосходными. Инструменты, которые были модифицированы для достижения степени обструкции менее 20%, дают очень небольшой прирост контрастности и рискуют столкнуться с другими оптическими проблемами. (Дополнительную информацию об ухудшении качества изображения, вызванном препятствием при наличии сферической аберрации, см. в конце главы 10.)

Из-за отсутствия точных знаний о допустимых препятствиях производители телескопов часто решают эту проблему чрезмерными мерами. Обычно они строят ньютоновские телескопы с слишком приземистыми фокусерами и минимальными диагоналями.

К сожалению, уменьшение размера диагонали часто приводит к компромиссу с работой других полезных функций телескопа. Возможно, это даже снижает непредвиденный запас прочности. Например, длинная фокусирующая трубка заслоняет внешний свет. Некоторые телескопы имеют окуляры, расположенные настолько низко, что свет может проникать в них напрямую - проблема, особенно распространенная в телескопах с открытой трубой. Другая трудность возникает, когда необходимо использовать линзу Барлоу. Фокус должен быть достаточно далеко от оптического пути, чтобы Барлоу не выступал перед зеркалом.

Диагональ также склонна к искривлению вблизи ее края, поэтому телескопы, которым для получения осяевого изображения требуется каждый бит диагонали, часто имеют уменьшенную диагональ.

качество. Конечно, малые диагонали вызывают виньетирование, и наблюдателям необходимо следить за тем, чтобы внешние части поля зрения были достаточно освещены для их любимых объектов.

Таким образом, благонамеренная попытка улучшить контрастность за счет уменьшения размера диагонали может иметь противоположный эффект. В результате таких усилий инструмент может быть настолько деформирован, что контраст будет намного хуже, чем он был бы при чуть большем препятствии.¹

9.2 Спайдер-дифракция

Опорное оборудование, на котором установлено вторичное зеркало, вызывает некоторую дифракцию света. Для линейных крестовин рисунок принимает форму двух или более радиальных шипов, удаленных от точечного изображения. Паучья дифракция берет яркое, расширенное изображение и размывает его в обе стороны.

Контраст снижается, но насколько? Очевидно, что если площадь лопастей, проецируемых на зеркало, невелика, паук не может рассеивать много света. Этот свет *выглядит* ярче, потому что оно размыто только в нескольких направлениях.

MTF паука с лопатками толщины $1/128$ Диаметр зеркала показан на рис. 9-4 (этот MTF усугубляется ухудшением 20%-ного препятствия). Толщина $1/16$ дюймов (около 2 мм) для зеркала диаметром 8 дюймов (200 мм). Обычно у небольших телескопов лопатки толщиной вдвое меньше. Несмотря на это, поначалу контрастность снижается всего лишь примерно на 1,6%. Площадь лопастей также составляет 1,6% от площади отверстия. Таким образом, существует простая взаимосвязь между площадью мелкомасштабного затемнения и степенью резкого ухудшения MTF.

Спайдер-дифракция вызывает быстрое падение MTF, и после этого ухудшение составляет примерно постоянную часть нормального поведения.² По очень небольшому уменьшению видно, что паутина дифракция является косметическим дефектом для большинства наблюдений в темном поле. Лишь в исключительных ситуациях это существенно влияет на контрастность изображения. Если, например, тусклая звезда находится в дифракционном спайке яркой звезды-компаньона, этот свет может стать проблемой. Дифракция паука не вызывает затруднений, если тусклая звезда находится одна или под другим углом к шипу, но поскольку ближайшая звезда очень яркая, шип может освещать всю область вокруг тусклой звезды. К счастью, многие телескопы допускают вращение паука или трубки.

¹Эти примеры не подразумевают, что маленькое вторичное зеркало не является похвальной целью. Если проектировщики телескопов осознают риски, они смогут их избежать. Ключевым моментом является не уменьшение вторичного размера за счет исключения всех других оптических факторов.

²Для моделей модуляции под углом 45° MTF восстановит максимальную пространственную частоту на 71% и даже немного превысит значение, ожидаемое в его отсутствие. MTF для целей с горизонтальными или вертикальными полосами демонстрируют менее резко меняющуюся структуру. См. Змек, 1993.

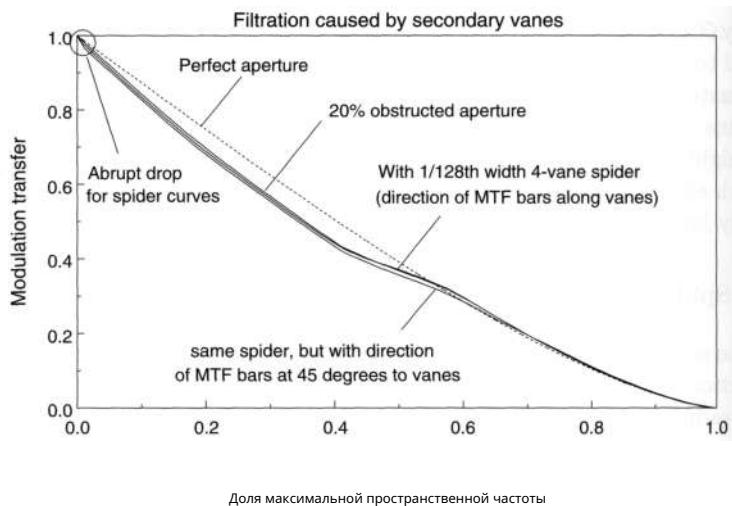


Рис. 9-4. Передаточная функция модуляции для спайдер-дифракции. Ухудшение незначительное по сравнению с апертурой без паука, закрытой на 20%. Самая нижняя кривая для рисунка MTF под углом 45° к лопаткам.

На протяженных ярких объектах, таких как планеты, паучья дифракция вызывает гораздо более тонкую деградацию. Каждая точка объекта имеет свои шипы. Низкоконтрастные детали могут быть размыты слабым светом, преломленным от паука. Площадь поверхности реалистичного паука с тонкими лопастями составляет около 0,5% площади апертуры. Таким образом, соотношение сигнал/шум может составлять всего 23 дБ. К счастью, большая часть рассеянного света находится за пределами планет. Если ширина лопаток составляет 0,5 мм, ширина дифракционных пиков составит около 100 угловых секунд. Дифракция лопасти-паука значительно превысит размер даже большого изображения планеты, такого как угол в 50 угловых секунд, образуемый Юпитером во время противостояния. SNR превышает 30-40 дБ для планетарных наблюдений. Свет, дифрагированный от лопастей-пауков, становится проблематичным главным образом при наблюдениях Луны и Солнца, где протяженность изображения превышает угол дифракции.

Несмотря на выводы, сделанные на рис. 9-4, спайдер-дифракция может быть важным фактором при проектировании. Если диагональные опорные лопатки слишком толстые, дифракционные пики становятся ярче. Большая площадь зеркала перехватывается и больше света отклоняется. Более толстые лопатки также имеют более короткие дифракционные шипы. Поскольку свет дифрагирует на меньшей площади, он относительно ярче.

Вы можете увидеть эффект широкой крестовины, протянув полоску черной изолянты через переднюю часть вашего инструмента (этот эксперимент работает даже для рефракторов и рефракторов Шмидта-Кассегрена — просто держите ленту подальше от линзы). Направьте телескоп на яркую звезду и используйте средний

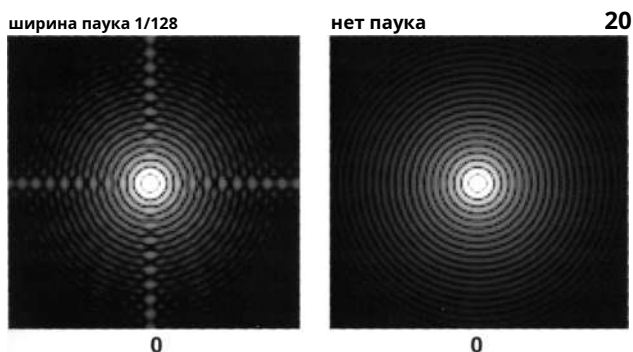


Рис. 9-5. «Переэкспонированная» монохроматическая дифракционная картина паука по сравнению с той же картиной, рассчитанной без паука.

окуляр с большим увеличением. Вы должны увидеть яркий луч света, расположенный под прямым углом к ленте. Этот шип блестит цветными блестками. Если звезда достаточно яркая, всплеск тускнеет по мере удаления от звезды, а затем снова становится ярче, возможно, так много раз. Вы наблюдаете боковые пики спайдерной дифракции, похожие на кольца дифракции с круговой апертурой.

Еще одна ошибка проектирования — использование чрезвычайно толстых крестовин с изогнутыми лопастями или маски подавления дифракционных шипов. Две такие маски были предложены А. Кудером с использованием лопастных крышек с загнутыми краями (Ингаллс, Книга вторая, 1978, стр. 620). Изображения не страдают от дифракционных всплесков, вызванных обычными пауками, но повышенный уровень рассеянного света все еще присутствует — просто распространяется под углом. При визуализации протяженных объектов (например, планет) не имеет значения, ограничен ли свет дифракционным пиком или усреднен по различным углам. Контраст снижается на ту же величину. Наиболее важным фактором является *доля* зеркала такие лопасти прикрывают. Единственным приемлемым изменением крестовинных лопаток является использование *тонкий* крестовины с изогнутыми лопастями или полностью устранить их, поддерживая вторичную обмотку на оптическом окне.

Сфокусированное изображение паука показано на рис. 9-5. Этот рендеринг не является очень реалистичным изображением, поскольку он рассчитан на монохроматический свет, который может излучать лазер. На изображениях в белом свете провалы в шипах будут заполнены другими цветами, давая лишь намек на структуру.

Хотя спайдер-дифракция является лишь незначительным неудобством для небольших телескопов, она может стать серьезной проблемой при проектировании больших инструментов. Поскольку механическая структура не масштабируется линейно, требования к поддержке больших вторичных отражателей могут быть действительно очень высокими. Тяжелые вторичные детали Кассегрена должны поддерживаться достаточно жестко, чтобы обеспечить выравнивание.

не страдает. Необходимы толстые лопатки, и дифракция на них становится значительной (Beyer and Clune, 1988).

В конце грубой регулировки следует убедиться, что вторичные опорные лопатки обеспечивают минимальную зону перехвата луча падающего света. Такое обслуживание ничего не стоит и может существенно улучшить изображение.

9.3 Затенение или аподизация

Дифракционные кольца являются одними из наиболее неприятных особенностей идеального кругового дифракционного изображения. Эта проблема, пожалуй, наиболее заметна на границе между яркой областью и темным фоном неба. Если зрение достаточно хорошее, эта граница не кажется резкой, но показывает «эхо»-изображения, одну или несколько тонких линий по краю. Наблюдатели должны знать об этом явлении, иначе они сообщат о ложных деталях изображения. Это особенно заметно на изображениях, которые сильно окрашены или просматриваются через цветные фильтры. Планетарные диски затемняются по краям, поэтому этот эффект трудно заметить на краю планеты. Однако проблема наблюдается в другом месте и всегда является источником помех при любом скоплении пятнистых деталей. Несколько дифракционных колец могут добавиться, чтобы создать еще одно пятно там, где его раньше не было.

Изменение характеристик пропускания апертуры называется *аподизация*.³ «Апод» буквально означает «без ног» и относится к затенению входного зрачка, что приводит к понижению дифракционных колец. Аподизация существовала неофициально до того, как получила свое название. Жакино и Кудер создали одномерный аподизатор в 1930-х годах для подавления тусклой стороны. линии, появившиеся рядом с яркими линиями на спектрографических пластинках (Жакино, 1958).

Р.К. Люнебург расширил определение аподизации, предложив набор обобщенные проблемы, которые не обязательно приводят к уменьшению колец, но вызывают модификации дифракционной картины для оптимизации любой заданной характеристики.³ На основании исследований Люнебурга можно с некоторой уверенностью сказать, что лучшая форма зрачка *большинстве случаев* является беспрепятственным (Luneburg 1964, стр. 344-359). Однако можно задать любые условия для дифракционного изображения, при условии, что какой-либо другой параметр может свободно изменяться.

Например, диаметр центрального пятна можно минимизировать, если высота дифракционных колец не имеет значения. Фактически, Дж. Торальдо ди Франсия разработал сложную систему затенения зрачков, которая приводит к произвольно высокому разрешению и подавлению дифракционных колец до заданного радиуса (ди Франсия, 1952). К сожалению, такой заштрихованный зрачок фантастически неэффективен для всех.

³По этой причине я лично предпочитаю термин *затенение*, который исходит из теории антенн и акустических решеток.

реалистичные апертуры, направляющие большую часть энергии луча в яркое кольцо за пределами указанного радиуса. Ограничитель поля должен находиться внутри этого радиуса, чтобы яркое кольцо не ослепляло звезду со сверхразрешением.

Аналогичным образом, К. Л. Дольф (1946) разработал метод затенения для антенн радара с линейной решеткой, который уравнивает разрешение и дифракцию. Это также работает для щелевых отверстий. Метод Дольфа предполагает произвольное подавление боковых лепестков до определенного уровня, окружающих центральный пик. Этот метод также неэффективен, но лучше всего помогает в случае сильных источников, где помехи с разных направлений создают проблемы.

Раннее систематическое исследование частично прозрачных покрытий линз для достижения повышенного разрешения было проведено Остербергом и Уилкинсом в 1949 году. Им теоретически удалось достичь диаметра центрального пятна, составляющего всего 77% от диаметра обычного диска Эйри. Коэффициент Штреля такой апертуры составляет 0,21, поэтому такое разрешение требует значительных оптических затрат. Первое дифракционное кольцо составляет около $1/10$ на высоте центрального пика. Это поведение похоже на поведение закрытых апертур, упомянутых ранее, но оно тщательно оптимизировано для нанесения наименьшего ущерба и в то же время для достижения самого высокого разрешения.

Все эти передовые решения имеют одни и те же общие характеристики: зрачки с высоким разрешением выглядят как закрытые апертуры с мягкими краями, в то время как зрачки с низким дифракционным кольцом становятся темнее по направлению к внешней стороне при медленном сужении (Баракат 1962; Жакино и Ройзен-Досье 1964).

Кроме того, эти продвинутые методы обычно не содержат простого затенения, которое могло бы быть обеспечено фильтром нейтральной плотности переменной интенсивности (особенно для повышения разрешения). Они переключают передачу туда и обратно между позитивом и негативом. По общему признанию, идея негативной передачи звучит странно. Можно представить себе, как свет исходит из глаза и возвращается через телескоп в обратном направлении. Истина имеет больше смысла: отрицательное пропускание относится к местам на апертуре, где фаза перевернута, или к областям, которые имеют равномерную абберацию в $1/2$ длины волны. Конечно, сдвиг апертуры в обе стороны фазы сильно снижает интенсивность центрального пятна. Такие фильтры также сложно изготовить.

Единственное рассматриваемое здесь затенение зрачков — это усеченная функция Гаусса. Гауссиана — это знакомая колоколообразная кривая, представляющая статистические отклонения в измерениях. Это похоже на кривую, которую иногда используют учителя, когда выставляют ученикам оценки. Гауссова апертура начинается с полного пропускания в центре и постепенно сужается, пока не будет достигнут край. Коэффициент пропускания апертурного зрачка моделируется формулой

$$T(\rho) = e^{-\rho^2/\omega^2}, \quad (9.1)$$

где ρ — радиальная координата и связано с шириной гауссианы. На рис. 9-6 показана такая схема передачи. Слово «усеченное»

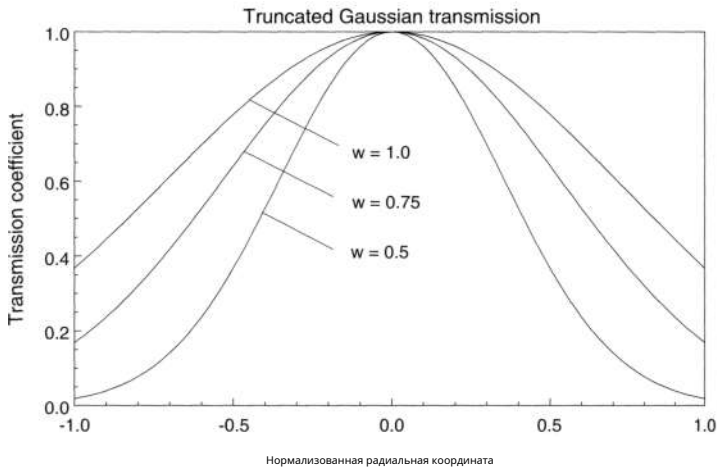


Рис. 9-6. Коэффициент пропускания гауссовского зрачка меняется в зависимости от радиуса. Внешняя часть апертуры имеет радиус 1,0.

относится к резкому перепаду на внешнем крае апертуры. По мере уменьшения ширины это падение становится менее важным, но чистая площадь в центре апертуры уменьшается с уменьшением ширины. Если пропускание на краю апертуры мало, полезное окно также будет меньше.

Функция Гаусса обладает уникальным математическим свойством. Когда кто-то рассчитывает дифракционную картину идеально круглого отверстия, результатом является сложное выражение, которое претерпевает множество колебаний – причина появления дифракционных колец. Если тот же расчет производится для неусеченного зрачка, закрашенного по Гауссу, результатом будет еще один гауссиан. Как только гауссова функция затухает, она больше не возникает. Поэтому на дифракционной картине нет колец вокруг нее.

Если функция Гаусса имеет небольшой спад на краю (как это происходит в усеченных примерах на рис. 9-6), кольца появляются снова, но они сильно подавляются. На рис. 9-7 показан сфокусированный вид усеченной гауссовой функции с $sH = 0,75\rho$. Во-первых, обратите внимание, что узор определенно немного больше. Во-вторых, вокруг центрального пятна остаются приглушенные кольца. Если повернуть картину вбок, то продольный срез дифракционной картины от этого усеченного гауссова зрачка будет виден на рис. 9-8. Мы по-прежнему видим узлы, но такое поведение значительно уменьшилось. Еще одна интересная особенность этой диаграммы — квадратный вид центральной ромба. По сравнению с обычной диафрагмой изображение кажется более связным и устойчивым к расфокусировке.

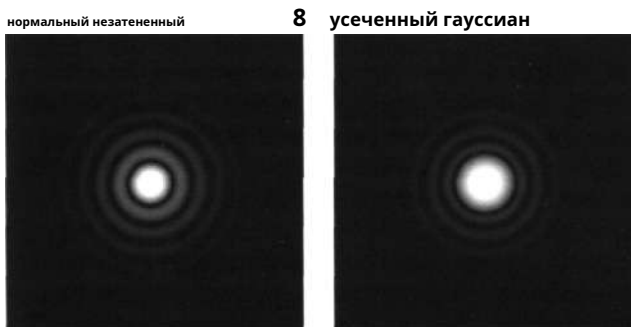


Рис. 9-7. В фокусе — идеальные незатененные и усеченные гауссовы зрачки..

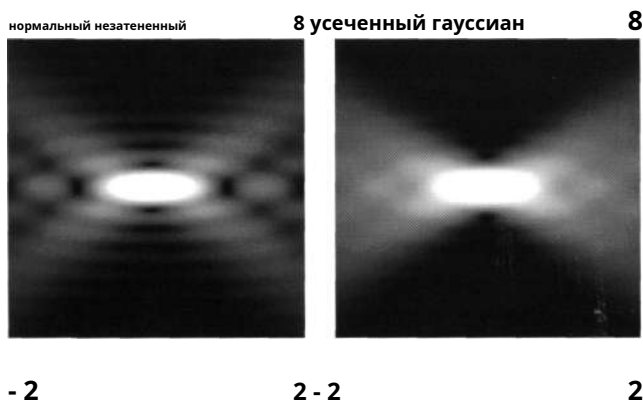


Рис. 9-8. Продольный разрез изображения нормального и гауссова зрачков.

Какие изменения происходят в изображении? Окруженная энергия $\psi''=0,75$ усеченная гауссиана представлена на рис. 9-9. Помните, эта диаграмма исправлена на простое затемнение диафрагмы. Таким образом, соотношение окружающих энергий приближается к 1, поскольку круг становится очень большим. Удивительно, но соотношение апертуры с аподией по Гауссу увеличивается, охватывая больше передаваемой энергии, чем нормальная апертура, на большей части диапазона.

Такое странное поведение связано с подавлением дифракционных колец. Для гауссова зрачка вся рассеянная энергия, которая обычно находится в отдаленных частях изображения, уже собрана. Нормальный зрачок заключает в диске Эйри лишь 83,8% энергии, 91% внутри края первого кольца, 93,8% внутри края второго кольца, 95,2%, 96,1% и т.д. Передача зрачка по Гауссу аналогична тому, как если бы вы взяли метлу и обходили изображение, сметая всю оставшуюся интенсивность к центру. Это размахивание не так аккуратно, как хотелось бы, поэтому энергия, направленная внутрь, накапливается на краю увеличенного дифракционного диска.

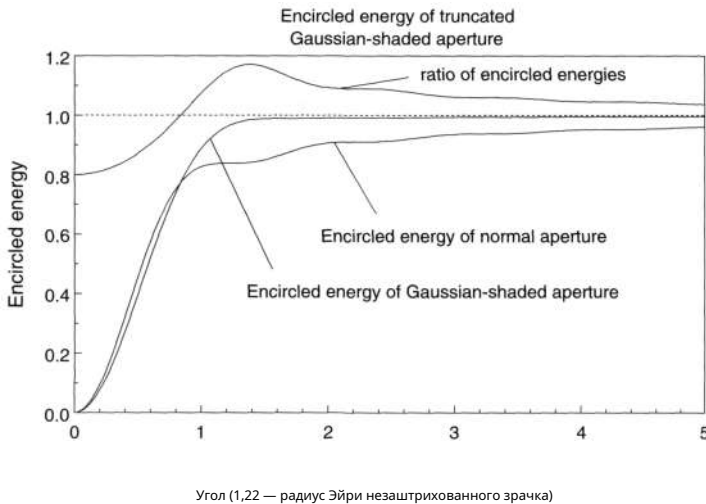


Рис. 9-9. Окруженная энергия, передаваемая усеченным гауссовым зрачком, по сравнению с нормальным незатененным зрачком.

На рис. 9-10 показано влияние на фильтрацию. Гауссова передача усиливает низкие пространственные частоты за счет высоких. Пониженный отклик на высокой пространственной частоте можно понять, если вспомнить, что центральное пятно более объемное. Усиление на низких частотах связано со сбором энергии из удаленных частей изображения. Цели низкочастотной модуляции имеют широкие полосы. Если энергия накапливается ближе к центру дифракционного диска, а не распределяется, меньше света просачивается из светлых областей в темные.

Таким образом, гауссовы аподизаторы не будут показывать детали очень близко к пределу разрешения телескопа с более высоким контрастом, даже если дифракционные кольца подавлены. С другой стороны, большая часть содержимого изображения имеет низкую пространственную частоту. Фильтр Гаусса поможет контрастировать функции, для которых не требуется вся разрешающая способность. Еще одним полезным преимуществом заниженных дифракционных колец является разрешение неравных двойных звезд, находящихся за пределами предела разрешения, когда яркое кольцо неудобно совпадает с тусклой звездой. Однако для обычных расширенных изображений уменьшение заметности колец не способствует повышению разрешения.

Аподизация пришла в любительскую астрономию с серией писем и статей в рубрике «Астроном-любитель» журнала *Научный американец* в начале 1950-х годов. Кульминацией этих статей стало предложение затенить зрачки с помощью слоев периодического скрининга (Леонард, 1954). Это предложение было умным и практичным способом добиться остроконечной формы зрачка.

Несмотря на неоднозначные результаты на карте MTF, аподайзеры уже много лет используются для наблюдения за планетами. Они энергично

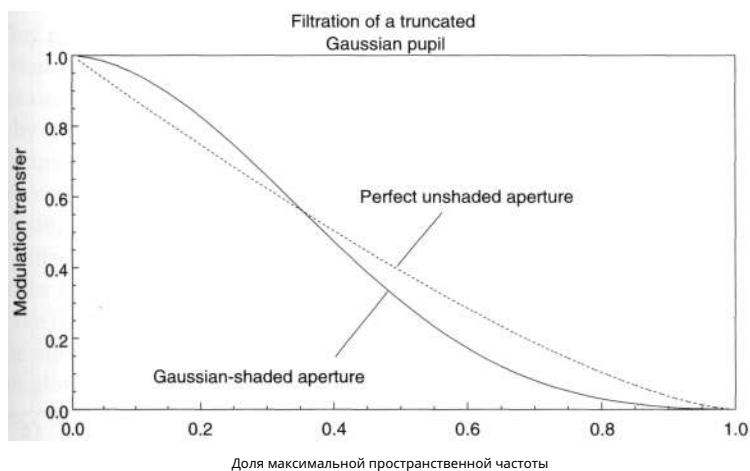


Рис. 9-10. MTF $\sigma w = 0,75$ пенсовсеченный зрачок Гаусса. Обычный MTF также построен для сравнения. Гауссиан сдвигает частотную характеристику от высоких пространственных частот к низким.

пропагандируется несколькими любителями, которые утверждают, что они полезны в качестве «видящих» фильтров, хотя их объяснения причины различаются (Ван Нуланд 1983; Гордон 1984). Эту популярность, даже несмотря на то, что она была ограничена небольшим числом наблюдателей, трудно игнорировать.

Существует ли механизм, с помощью которого эти фильтры могут стабилизировать изображение? Эдберг (1984) предположил некоторые косвенные преимущества, в том числе закрытие апертуры, уменьшение ослепительной яркости планет и покрытие плохого оптического изготовления. Гордон (1984) предположил, что движущиеся кольца, связанные с турбулентностью, переходят в диск Эйри. Если колец нет, размытие уменьшается.

В другой статье предполагалось, что фильтр Гаусса может сместить контрастность с высоких пространственных частот (где турбулентность все равно разрушает изображение) на низкие пространственные частоты. Таким образом, более грубые детали, которые все еще были видны сквозь турбулентную атмосферу, отображались с более высоким контрастом (Suiter 1986b). MTF круглого отверстия, нарушенного турбулентностью, подтверждает это утверждение. Рисунок 9-11 иллюстрирует гауссову MTF пропускания зрачка для одного момента турбулентности.

На этом рисунке показано, как смещается контраст. Ниже пространственной частоты около 0,4 максимума система с гауссовским фильтром работает лучше, чем открытый телескоп. Ниже 0,1 прибор с гауссовским фильтром передает контраст лучше, чем идеальная неаберрированная система.

Например, идеальный 10-дюймовый (250-мм) телескоп может распознавать цели MTF со столбиками, разделенными примерно $\frac{1}{2}$ угловой секунды. Однако, когда беспокоит

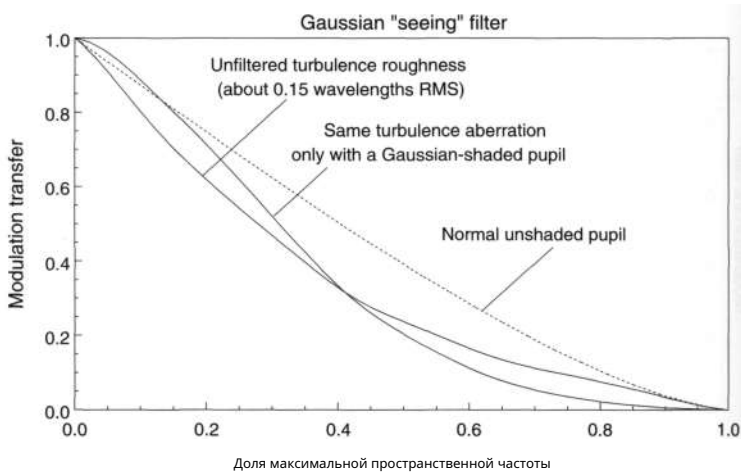


Рис. 9-11. Улучшение контрастной передачи низких пространственных частот для $\sigma = 0,75\rho$ Зрачок гауссовского фильтра страдает от турбулентной абберации со среднеквадратичным значением $0,15$ длины волны. Также показана та же апертура без затенения. Изображен один угол ориентации MTF во время одного снимка. На более высоких пространственных частотах кривая нестабильна.

при среднеквадратичной турбулентности $0,15$ длины волны кривая MTF сильно колеблется для столбцов, разделенных примерно $0,8$ угловыми секундами и ниже. Затем мы можем отказаться от контраста при высоких разрешениях (где поведение в любом случае ненадежно) и сместить его на пространственные частоты, где его можно будет использовать с пользой. При использовании гауссовской фильтрации расстояние между полосами около $1,5$ угловых секунд и выше отображается с более высоким контрастом, чем при неподизированной апертуре. Выше 4 угловых секунд аподизированная апертура ведет себя лучше, чем идеальная круглая апертура в спокойную ночь.

Таким образом, аподизирующий фильтр Гаусса действительно помогает во время приступов плохого зрения, но делает это лишь косвенным образом. Фильтр наблюдения, возможно, полезен для того, чтобы превратить плохую видимость в сносную, но для критического разрешения необходимо не что иное, как ровное небо и полная апертура.

9.4 Пыль и царапины на оптике

Формально мы можем использовать, по общему признанию, эзотерическую тему суперпозиции отверстий, чтобы объяснить эффект центральной преграды. Центральное препятствие может быть математически заменено отрицательно колеблющейся апертурой, которая просто компенсирует положительно колеблющуюся область полной апертуры над ней - принцип Бабины. Эта процедура работает так же для меньших препятствий, таких как частицы пыли, только в этом случае пылинки или царапины действуют как множество точечных отверстий или коротких щелевых отверстий.

Крошечные отверстия и щели не имеют хорошего разрешения. Они излучают рассеянное свечение, распространяющееся по всему полю зрения. Такое поведение можно наблюдать в некоторых лабораторных экспериментах. Если яркое изображение едва скрыто от поля зрения линейкой (как в тесте Фуко), на затемненной апертуре действительно можно увидеть блестящие пятна пыли.

Мы можем предсказать кривую передаточной функции модуляции, не вычисляя ее. Оно очень похоже на МТФ, рассчитанное для крестовин. Если бы значительная часть зеркала или линзы была покрыта пылью или царапинами (скажем, 1%), контраст внезапно упал бы на 1%. После этого деградация МТФ останется достаточно постоянной. Причина внезапного падения проста. МТФ всегда должен начинаться с 1, но рассеянное свечение одинаково влияет на узкие и широкие полосы. Только когда полосы станут очень широкими, утечка из яркой полосы не распространится на темную область.

Диафрагмы, у которых 1% площади покрыто пылью, действительно, очень грязная оптика. Почти каждый держит линзы и зеркала в чистоте. Представьте себе, как пятнистой выглядела бы оптика, если бы на каждый квадратный сантиметр был перекрыт 1 квадратный миллиметр (примерно площадь головки булавки). Проем диаметром 200 мм имеет площадь более 314 см.². Рассыпание соли на зеркало или линзу едва ли может вызвать засорение на 1%.

Пыль и царапины, как и паутиная дифракция, в основном являются косметическими ошибками, за исключением необычных ситуаций, когда яркие, неинтересные объекты расположены близко к объекту наблюдения. Если бы тусклый объект глубокого космоса наблюдался совсем рядом с ослепительной звездой (например, NGC 404 за Бетой Андромеды или NGC 2024 возле Зеты Ориона), то рассеянное свечение, окружающее яркую звезду, вторгалось бы в изображение тусклого объекта. Уловки наблюдения, такие как затемнение звезды за диафрагмой, могут уменьшить рассеяние в окуляре и глазу, но если основная линза или зеркало запылились, ущерб уже нанесен. Посторонний свет все равно будет выглядывать за край остановки. Избыточная пыль на оптике также может ухудшить обнаружение малоконтрастных деталей на ярких протяженных объектах, например планетах, поскольку рассеянный свет существует в общей дымке.

Максимальное количество грязи, которое наблюдатель должен выдержать на оптике, составляет около 1/1000 площади поверхности. В главе 3 мы уже видели, как это может привести к снижению отношения сигнал/шум до 30 дБ. К счастью, большая часть

«Традиционно шум меняется со временем и имеет случайное местоположение. Таким образом, я называю рассеянный свет «шумом» некорректно в том смысле, что светорассеяние кажется неподвижным и полностью определяется деталями на апертуре. Тем не менее, я использую концепцию соотношения сигнал/шум, поскольку рассеянный свет аналогичным образом ухудшает качество изображения. В этой книге отношение сигнал/шум используется для сравнения рассеянного или дифрагированного света с лежащим в его основе «истинным сигналом», придавая относительный вес самым различным явлениям. Однако помните, что такое употребление следует рассматривать только как аналогию или полезную выдумку, и не следует заходить слишком далеко.

гало выходит за пределы планеты. Следовательно, большая часть рассеяния некрасива, но не вредна. Как и в случае с паутиной дифракцией, наихудшие значения отношения сигнал/шум присущи очень крупным объектам светлого поля, таким как Солнце и Луна. Трудно оценить долю оптики, покрытой грязью, но $1/1000$ площади — это размер одного препятствия примерно $1/30$ диаметра. На зеркале диаметром 200 мм скопившаяся грязь покроеет пятно диаметром 7 мм — чуть меньше размера ногтя мизинца. Даже настолько грязный телескоп не будет способствовать значительному дополнительному рассеянию на рефлекторе с крестовинными лопастями, и для таких инструментов, возможно, можно было бы несколько ослабить устойчивость к загрязнению.

Наблюдателю следует принять во внимание еще одно предупреждение. У некоторых владельцев телескопов, прочитав приведенные выше комментарии, может возникнуть соблазн слишком часто чистить зеркала или линзы. Оптика имеет деликатные покрытия, поэтому самым безопасным способом является их очистка. *Оставь их в покое.* Злоупотребление даже самыми щадящими чистящими средствами оставляет на покрытиях множество крошечных царапин. Не принимайте решение чистить зеркала, осветив трубу фонариком ночью. Все зеркала не выдерживают такой суровой проверки.

Лучшая процедура по очистке оптики – не промывка, а профилактика. Держите их закрытыми и сухими. Чистите их только в том случае, если вы считаете, что они подверглись химическому воздействию или когда пыль начинает заметно влиять на изображения. Конечно, специализированным наблюдателям всегда могут потребоваться более чистые поверхности, но эти люди, без сомнения, уже поняли о значительных рисках и связанных с этим расходах (более частое алюминирование и т. д.). Соблюдая правила технического обслуживания, вам не придется слишком часто чистить оптику.⁵

⁵Часто энтузиасты-изготовители зеркал алюминировуют зеркало, прежде чем оно будет по-настоящему отполировано. Они либо покрыты дымкой ямок, либо имеют нечеткое кольцо, выходящее к краю. К сожалению, такие зеркала вообще не поддаются «чистке» и обычно не подлежат восстановлению. Их необходимо вернуть к полировке.

Глава 10 Сферическая

Аберрация

Самая распространенная ошибка на стекле называется сферической аберрацией. В некоторой степени он присутствует на всех поверхностях и не обязательно становится изнурительным, хотя это зависит от его тяжести.

Звездный тест на сферическую аберрацию удивительно чувствителен и прост в интерпретации. В этой главе будут рассмотрены пять пунктов:

1. Волновые фронты, деформированные простой сферической аберрацией (кривые четвертого порядка), можно распознать, если заметить, что свет примерно повторяет поведение каустики лучевой оптики. На одной стороне фокуса свет берется из внешних частей расфокусированного диска и попадает в его центр. На другой стороне фокуса свет, исходящий из центра, освещает самые дальние кольца.
2. Силу сферической аберрации низшего порядка можно грубо оценить, используя центральное препятствие и сравнивая точки прорыва центральной тени с обеих сторон. Ошибка коррекции должна быть единственным отклонением, способствующим тому, чтобы этот метод оценки был действительным.
3. Сферические аберрации более высокого порядка, хотя и заметны в звездных испытаниях определенных конструкций, в чистом виде практически никогда не наблюдаются.
4. Путем расчета энергии, выделяемой в пределах углового радиуса λ/D (около края дифракционного диска) пользователь телескопа может с пользой сложить вместе эффекты сферической аберрации и центрального препятствия. Это соотношение энергии в кружочках дает число, аналогичное коэффициенту Штреля, но оно включает в себя ухудшение обструкции в одном стандарте.
5. Погрешность коррекции в четверть длины волны позволяет получить изображения протяженных объектов, которые заметно мягкие, но едва приемлемые.

10.1 Что такое сферическая абберация?

Поскольку они кажутся имеющими форму неглубоких чаш или выступов, естественно предположить, что совершенные зеркала и линзы представляют собой сечения сфер. Однако сферы — не лучшая геометрическая форма для создания изображения. Следующий мысленный эксперимент делает это очевидным. Представьте себе внутреннюю поверхность полушария в виде зеркала и свет, падающий из бесконечнодалека справа, как на рис. 10-1. Свет, падающий на края, практически не отклоняется; он целует внутреннюю часть и подпрыгивает вокруг полукупола. Свет, падающий ближе к центру, отклоняется к своего рода фокусу, но свет, падающий вблизи оси, направляется дальше всего. Область фокуса на рис. 10-2 расширена, чтобы продемонстрировать, что фокус изогнут от геометрической точки к роговой каустической оболочке.

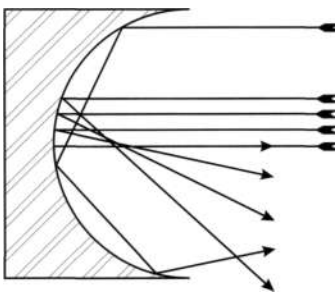


Рис. 10-1. Полукупольное сферическое зеркало. Фокус становится более четким по мере приближения падающего луча к краю.

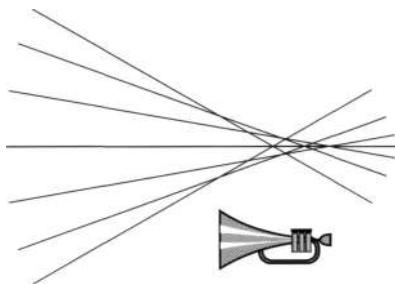


Рис. 10-2. Едкий «рог».

Первоначальное значение слова *едкий* «горел», поэтому оптическая каустика находится в фокусе или близко к нему. В трассировке лучей этот термин приобрел несколько иное значение. Каустика — это кривая или поверхность, вдоль которой как бы скапливаются лучи.

Это относится к местам, где геометрическое распространение или сближение пучка лучей не дает правильного значения интенсивности. Каустики — это места, где приходится прибегать к теории дифракции.

Тип сферической аберрации, показанный на рис. 10-1, называется сферической недокоррекцией. При гиперкоррекции порядок обратный. Свет, падающий в центре, пересекает ось слишком близко к объективу, а свет, падающий на краю, пересекает ось в самой удаленной точке. При чрезмерной коррекции рог направлен в другую сторону.

Лучшая конфигурация поверхности для изображения света варьируется от телескопа к телескопу. Некоторые объективы, такие как составные рефракторные линзы, корректируют сферическую аберрацию путем изгиба или разделения сферических поверхностей. Здесь дизайнер использует хитрость, чтобы сохранить легко изготавливаемую сферическую форму. Аналогичный изгиб происходит и в конструкции Максудова. Оболочка мениска на самом деле не обладает большой фокусирующей способностью, поскольку задняя поверхность имеет примерно такую же кривизну, как и передняя. Настоящая цель — модификация аберрации. Другие телескопы разделяют бремя исправления сферической аберрации основного фокусирующего элемента с помощью странно деформированной корректирующей пластины, как в обычном телескопе Шмидта-Кассегрена.

Для телескопов только с одним фокусирующим зеркалом (т. е. ньютоновскими рефлекторами) правильной геометрической формой является параболаид. Плоская вторичная часть отклоняет луч, поэтому голова наблюдателя не мешает, но не участвует активно в формировании изображения. Параболаид — это частный случай семейства поверхностей, называемых *конические сечения вращения*.

Классические Кассегрены сочетают параболаидальную первичную обмотку с гиперболаидной вторичной обмоткой для достижения необходимой сферической коррекции. Можно вынуть вторичное зеркало классического Кассегрена и установить диагональ, чтобы использовать его как ньютоновское. Вторичное зеркало должно самостоятельно корректировать присущую ему сферическую аберрацию. Можно было бы разумно предположить, что вторичный элемент должен быть выпуклым параболаидом, но вторичный элемент не выполняет ту же работу, что и основной, поэтому его необходимо изогнуть по-другому.¹

Другие инструменты типа Кассегрена, такие как тип Далла-Киркхема, исправляют только часть сферической аберрации всей системы в каждом зеркале. Выпуклая вторичная часть остается сферической. Это маленькое зеркало добавляет компонент сферической аберрации противоположного знака к вогнутому сферическому главному зеркалу, но этого количества недостаточно для полной коррекции системы. Как следствие, правильно изготовленное главное зеркало Далла-Киркхема деформируется в вытянутый сфероид (между сферой и параболаидом). Далл-Киркхамс популярен среди производителей телескопов, потому что сферическую вторичную часть легко изготовить. Однако они страдают от тяжелой внеосевой комы.

¹Одна из своеобразных конструкций в стиле Кассегрена — афокальное зеркало Мерсенна — имеет параболаидное вторичное зеркало. Этому любопытному телескопу не нужен окуляр (King 1955, стр. 49-50).

Дизайн Ричи-Кретьена идет другим путем. Поместив более сильные гиперболоидальные кривые как на главное, так и на вторичное зеркала, дизайнер может добиться степени коррекции комы, превосходящей классическую систему Кассегрена. Однако эти телескопы сложно изготовить, и обычно они представляют интерес только для профессиональных обсерваторий. Космический телескоп Хаббл был спроектирован по схеме Ричи-Кретьена.

10.2 Космический телескоп Хаббл

Летом 1990 года произошло событие, которое сделало ранее эзотерическую тему сферических aberrаций главной полосой новостей. Выяснилось, что космический телескоп Хаббл (HST) был изготовлен неправильно. По сообщениям газет, он пострадал примерно от $1/2$ длины волны сферической aberrации и что край зеркала составлял почти 2 микрона (или 2 мкм) выключенный.

Поначалу эти заявления привели в замешательство. А 2 мкм поверхностная ошибка приведет к неправильному искривлению волнового фронта примерно на 4 мкм, или примерно на 7,25 длин волн желто-зеленого света. Если фокус настроен на минимальное среднеквадратичное отклонение, а не на фокус центральной зоны, это значение уменьшается в 4–1,8 раза.

Эта цифра была уточнена в статье *«Небо и телескоп»* упомянул, что aberrация длины волны $1/2$ измерялась как среднеквадратичное (RMS) отклонение (Sinnott 1990a). Чтобы получить значение размаха амплитуды из среднеквадратического значения, нам необходимо умножить его на коэффициент примерно $13,4/4$, поскольку для ошибок коррекции

$$\frac{1}{4} \text{ длины волны (от пика до впадины)} = \frac{1}{13,4} \text{ длины волны (СКЗ)} \quad (10.1)$$

поэтому $\frac{1}{2}$ длины волны RMS $\times \left(\frac{13,4}{4} \right) = 1,68$ длины волны.

Наиболее известное любителям сравнение — с методом Рэлея. $1/4$ -допуск на длину волны — в этом расчете получается 1,7 длины волны для космического телескопа Хаббла, если предположить, что $1/2$ среднеквадратическая погрешность длины волны была точной.

Первопричиной ошибки было неправильно собранное устройство под названием нуль-тестер, используемое при изготовлении главного зеркала. Этот нуль-тестер должен был генерировать волновой фронт именно с обратной коррекцией, как у главного зеркала. Таким образом, зеркало, которое отменит эту поправку, будет совершенно правильным. К сожалению, нулевой тестер был расположен неправильно и выдавал неправильную обратную коррекцию (S&T 1990; *Sapers и другие*.1991).

10.3 Генерализованная сферическая абберация

С точки зрения звездного теста вам не придется задумываться о форме оптических поверхностей или даже запоминать их длинные названия. Рассмотрим только форму конечного волнового фронта, вычтенную из идеальной сферы. Эту разницу можно представить в виде простой полиномиальной функции:

$$W(\rho) = A_0 + A_2\rho^2 + A_4\rho^4 + A_6\rho^6 \dots, \quad (10.2)$$

где ρ — радиальная координата в диапазоне от 0 до 1. Символ $W(\rho)$ означает полное искажение этого волнового фронта от сферы с центром в фокусе. Если $W(\rho)$ равно нулю, то кривые одинаковы. Давайте посмотрим на каждый из этих терминов и коэффициенты перед ними («А») и обсудим, что они означают.

Первое — это константа, A_0 это только продвигает или задерживает волновой фронт. Мы можем думать об этом числе как о постоянной «времени» или «фазе», и ее следует выбирать так, чтобы сфера сравнения не находилась слишком далеко от волнового фронта. Эта константа представляет распространение с разными значениями A_0 представляющие снимки, сделанные в разное время. Обычно константа устанавливается равной нулю при прохождении волны через апертуру или иным образом регулируется для удобства.

Термин $A_2\rho^2$ представляет собой плавный изгиб, либо слегка толкающий волновой фронт, либо несколько вытягивающий его. Если центр нашей эталонной сферы расположен не в той фокусной точке, на этот член приходится основной удар увеличения. Таким образом, $A_2\rho^2$ называется здесь «абберацией дефокусировки» и является той же самой, что показана на рис. 4-15.

Термин A_2 дефокусировки концептуально может быть включен в расширение сферических аббераций, и с точки зрения звездного тестирования дефокусировку следует рассматривать как просто еще одну абберацию. Однако расфокусировка не является особенностью стекла, поэтому термином сферическая абберация ее не принято называть. Расфокусировка настолько важна, что ее откладывают в сторону и рассматривают отдельно.

Член четвертого порядка, $A_4\rho^4$, это то, что обычно считают *сферической абберацией*. Другое название этого термина *Первичная сферическая абберация*. Ошибки здесь называются ошибками «коррекции», такими как недостаточная или чрезмерная коррекция.

Условия $A_6\rho^6$...обычно малы, но могут стать важными в необычных оптических системах. По многоточию видно, что это расширение продолжается вечно, но каждый фактор A_n обычно намного меньше предыдущего коэффициента. Мы можем рассматривать A_6 коэффициент как последний важный термин в этой главе.

Сферическую абберацию можно выразить рядом равнозначных соглашений. Другой способ обозначения волнового фронта четвертого и шестого порядков.

термином является называть их сферическими абберациями третьего и пятого порядка. Эти названия происходят от наклона волнового фронта, а не от самого волнового фронта. и насколько свет смещается в сторону от центра дифракционного пятна. Некоторые авторы считают более удобным рассматривать остаточные изменения фокусного расстояния при ρ , или «продольная абберация» (Kingslake 1978, стр. 114). При таком взгляде на ошибки первичная абберация — это коэффициент ρ^2 член. Таким образом, мы можем найти одну и ту же первичную сферическую абберацию, выраженную через коэффициенты четвертого, третьего или второго порядка, в зависимости от того, относится ли полиномиальное разложение к волновому фронту, к остаточному наклону или к продольной абберации соответственно. В этой книге мы всегда будем обращаться к волновому фронту.

10.4. Абберационные функции

Абберации обычно измеряются в положении наилучшего фокуса², поскольку там паразитный диск наименьший. Именно это мы думаем, когда говорим: «Телескоп сфокусирован». Когда A_4 равен нулю, уравнение 10.2 имеет положение фокуса, произвольно установленное в так называемом «параксиальном» фокусе, или фокусе центра зеркала или линзы (узкий конец каустического рога выше). Хотя это удобное место для математических расчетов формы волнового фронта, оно не имеет ничего общего с местом, где мы визуально воспринимаем самый узкий диск.

Если мы сделаем константу A_4 ненулевой, например, мы обнаруживаем, что необходимо добавить некоторую расфокусировку, чтобы добиться наилучшего фокуса, когда он ускользает. Если мы изменим A_4 во второй раз мы должны снова переместить фокус. Термин A_4 создает еще больше осложнений. Если мы хотим рассмотреть чистые сферические абберации более высокого порядка в наилучшем положении фокуса, мы должны вычесть нужное количество более низких порядков. Удаление этих терминов может быть утомительным, хотя с вычислительной точки зрения этот процесс прост.

Гораздо удобнее инкапсулировать ровно столько аббераций низшего порядка, чтобы автоматически исключать их из каждого члена по мере его увеличения. Этот шаг в значительно более сложной форме был предпринят Фрицем Цернике, и полученные члены называются ортогональными полиномами Цернике (Борн и Вольф, 1980). Интересные термины здесь ограничены 4-м и 6-м порядками, но они существуют и для более высоких порядков:

$$\begin{aligned}
 W_4(\rho) &= -\frac{A_4}{6} \left(\frac{2}{3} \rho^6 - \frac{41}{6} \rho^4 \right) \\
 W_6(\rho) &= -\frac{A_6}{6} (20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)
 \end{aligned}
 \tag{10,3}$$

На коэффициентах ставятся штрихи, чтобы указать, что они не являются

²также называется «дифракционным фокусом»

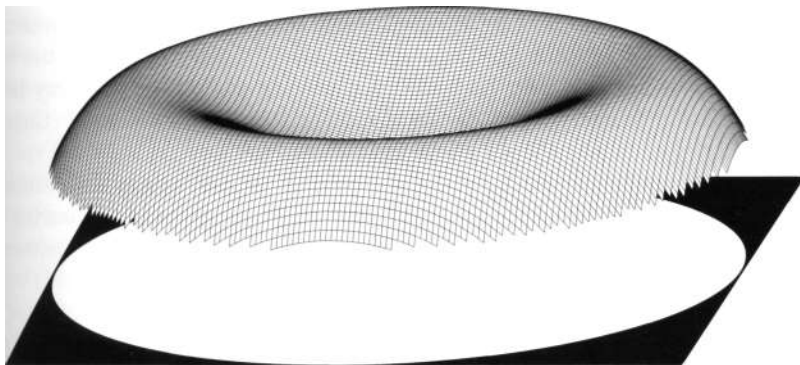


Рис. 10-3. Абберация функции Цернике $W_3(r)$, иллюстрирующий чрезмерную коррекцию в лучшем случае фокусировки.

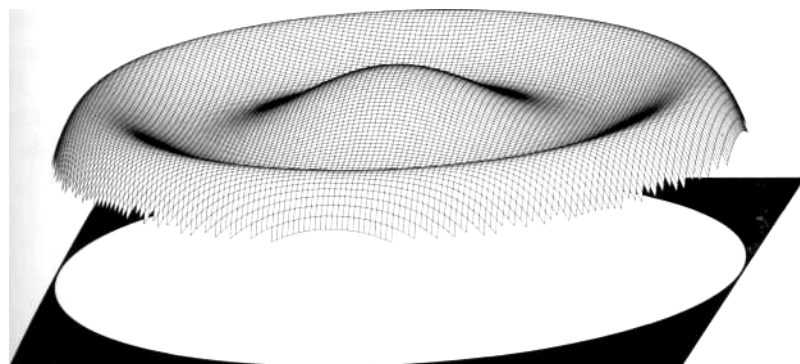


Рис. 10-4. Абберация функции Цернике $W_6(r)$, описывающая сферическую абберацию высшего порядка.

того же размера, что и в уравнении. 10.2. Эти сложные на вид уравнения несколько упрощаются, если их представить в виде функций аббераций (см. рис. 10-3 и 10-4). Все сфокусированные шаблоны, показанные ниже, указаны рядом с положениями фокуса, подразумеваемыми в этих функциях.

Функциональная форма полинома Цернике четвертого порядка имеет только одно кольцо в форме бублика, тогда как полином более высокого порядка имеет приподнятый центр. Полиномы 8-го, 10-го и более высокого порядка добавляют по одному дополнительному витку каждый. Фактически, по мере того, как мы поднимаемся выше, рисунок становится все более гофрированным. Но помните, что сумма этих полиномов представляет собой гладкие поверхности. Знаки и амплитуды выбраны так, чтобы исчез вид стиральной доски. Только для зональных дефектов из главы 11 аномальные вклады полиномов высоких порядков складываются и дают ненулевой результат.

Функция 6-го порядка, хотя и не изображена на графике, имеет более замысловатую каустическую форму. Представьте себе, если бы очень сильный человек залез в раструб музыкального рожка (рис. 10-2) и протянул мундштук наполовину назад. Результирующий ущерб будет очень похож на едкий (Cagneti *и другие* 1962).

Еще один незначительный момент заключается в том, что положение дифракционного фокуса слегка смещается, если телескоп закрыт. Большинство шаблонов, представленных в этой главе, учитывают это изменение. Исключением являются продольные срезы.

10,5 Ошибка коррекции (сферическая aberrация низшего порядка)

10.5.1 Фильтрация сферической aberrации

Передаточная функция модуляции (MTF) изображена на рис. 10-5. Свисающие линии показывают, как снижается контраст по мере постепенного усиления сферической aberrации. Одной из интересных особенностей является небольшое увеличение, которое происходит при небольших aberrациях вблизи пространственной частоты от 0,5 до 0,6 от максимума. Это восстановление соответствует частоте, при которой расстояние между целевыми полосками составляет примерно расстояние до первого дифракционного кольца. Он провисает с обеих сторон.

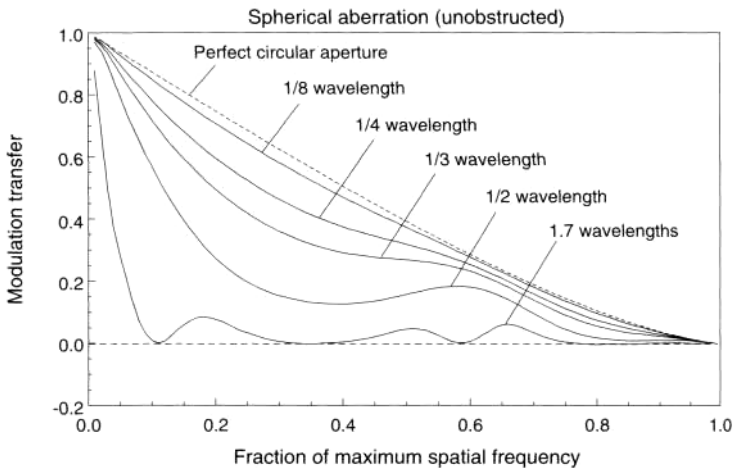
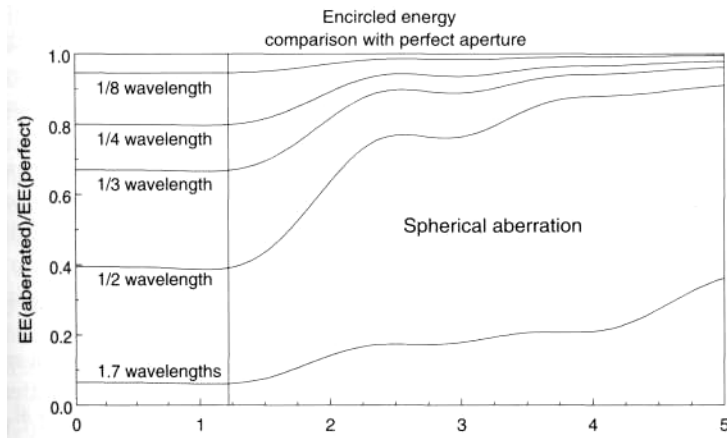


Рис. 10-5. MTF характеристика ошибки коррекции.

ФПМ существенно ухудшается при выходе апертурного зрачка из $1/8$ и $1/4$ длины волны полной aberrации, подчеркивая, что оптическое качество начинает ухудшаться примерно на $1/4$ длины волны коррекции ошибки.

Сферическая aberrация смещает свет от центрального диска к внешним частям дифракционной картины. Особенностью сферической aberrации является то, что она оставляет центральное ядро изображения в покое (пока aberrация не станет достаточно сильной), а не снижает его интенсивность. Сферическая aberrация истощает энергию центрального диска Эйри и передает ее кольцам. На рис. 10-6 показан график коэффициента энергии возрастающей сферической aberrации низкого порядка в зависимости от уменьшенного угла. Обратите внимание на плоский или почти плоский вид соотношения энергий вокруг радиуса диска Эйри. Эта сигнатура идентифицирует сферическую aberrацию любого порядка (даже легкая дефокусировка демонстрирует такое своеобразное поведение). Энергия была удалена из центрального диска aberrированного зрачка, но он достаточно хорошо сохраняет неабerrированную форму, пока не выйдет за пределы первого кольца. Также на рис. 10-6 показано соотношение энергии для $\lambda/4$ Длина волны сферической aberrации пересекает нулевой радиус на отметке 0,8, как раз там, где и должно быть согласно коэффициенту Штреля.



Угол (край диска Эйри под углом 1,22)

Рис. 10-6. Окруженная энергия беспрепятственных отверстий, страдающих от сферической aberrации разделенный окруженной энергией идеального круглого отверстия.

Эффект истощения энергии в основном изображении заключается в сохранении более или менее эквивалентного (но более тусклого) диска Эйри, окруженного размывом, которое уменьшается с расстоянием. Детализация планет значительно ухудшается, поскольку низкоконтрастные темные пятна часто располагаются очень близко к ярким областям, которые растекаются или размываются. Диаграмма MTF показывает, что наименее худшие последствия ошибки коррекции начинают проявляться для разметки поверхности, расстояние между которой составляет около $\lambda/2$ до $\lambda/3$ предела разрешения прибора. Таким образом, aberrированный телескоп, способный различать звезды, разделенные 1 угловой секундой, показывает детали планет.

(например, полосы, разделенные менее чем примерно 2 или 3 угловыми секундами) со значительно сниженным контрастом.

10.5.2 Шаблоны ошибок коррекции звездообразного теста

При звездном тестировании вы можете просмотреть изображение через цветовой фильтр, чтобы избежать эффектов смешения цветов. Поскольку максимальная чувствительность человеческого глаза приходится на желтый или зеленый цвет, вы, вероятно, сможете получить большую часть информации с помощью фильтра, ориентированного на эти цвета. Если вы используете искусственный источник (например, фонарик), некоторая случайная фильтрация вызвана более низкой цветовой температурой нити накаливания. Вы можете открыть для себя полезный эффект фильтрации, проверяя телескоп на Арктуре в туманную ночь. Звезда по своей природе желтая и при прохождении через дымку окрашивается так сильно, что становится оранжевой. Однако несколько цветных фильтров отсекают весь свет других полос. Не следует ожидать точного воспроизведения рассчитанных здесь монохроматических дифракционных картин.

Конечно, вы можете попробовать другие фильтры, но имейте в виду, что при переходе от синего к красному ошибка длины волны уменьшается. Красные фильтры могут помочь вычистить мусор небольшой амплитуды из изображения дифракционной картины, когда вы пытаетесь увидеть широкие деформации волнового фронта.

Поведение сфокусированного изображения показано на рис. 10-7, где сферическая аберрация варьируется от 0 до 1,7 длин волн. Все ошибки коррекции отличаются от идеальной диафрагмы, но первое кольцо плохо светлеет при аберрациях больше $\lambda/4$ волна. Поскольку использование вторичной обмотки очень распространено, аналогичное сравнение сделано для апертуры, закрытой на 33%, на рис. 10-8.

Поведение вне фокуса показано на рис. 10-9 и 10-10, причем каждая последующая пара имеет немного худшую недостаточную коррекцию. Каждый из этих шаблонов рассчитан для 10 длин волн дефокусирующей аберрации. Тяжелый случай с длиной волны 1,7 рассчитывается для сверхкоррекции (обратите внимание на перевернутый вид диаграмм). Здесь появляется прочное внешнее кольцо *снаружи* фокуса. На этих рисунках мы видим срезы каустика роговидной формы. С одной стороны фокуса рог разрезан возле пылающего колокола. Как следствие, большая часть энергии ограничивается тонким внешним кольцом. На другой стороне фокуса рог срезан рядом с мунштуком, поэтому большая часть энергии концентрируется вблизи центра. Тем не менее, много энергии выливается в окружающую область, из-за чего диск выглядит размытым.

Опять же, поведение расфокусировки показано для 33% препятствия на рис. 10-11 и 10-12. Ошибка в 1,7 длины волны не точно воспроизводит картину, ожидаемую от космического телескопа Хаббл перед ремонтной миссией, но такое поведение является хорошим приближением.

При меньшем количестве сферических аберраций вам нужно меньше расфокусироваться, чтобы

хорошо покажите узоры. На рисунке 10-13 показан вид aberrации при дефокусировке, составляющей всего 5 длин волн.

10.5.3 Оценка серьезности проблемы

Ошибка коррекции создает заметный контраст между моделями звездного теста с внутренним и внешним фокусом. Опытный наблюдатель в отличных условиях наверняка сможет обнаружить ошибки, меньшие, чем $1/10$ длины волны и, возможно, $1/20$ длин волн (Велфорд, 1960). По иронии судьбы, звездный тест на сферическую aberrацию слишком чувствителен. Это настолько показательно, что почти любой телескоп не выдерживает случайного осмотра.

Система обнаружения света с высоким разрешением позволит проводить измерения на расширенном звездном диске и точно определять, как aberrация влияет на телескоп. Поскольку глаз — ужасный радиометр, ему нельзя доверять измерение яркости. Люди, которые используют глаз для определения величины переменных звезд, добиваются успеха только в том случае, если они следуют тщательной процедуре с использованием аналогичных звезд сравнения. Оценка яркости протяженных объектов (например, расфокусированных звездных дисков) безнадежна. Для выполнения этой работы использовались тщательно откалиброванные датчики освещенности, но такое решение требует точного знания расстояния расфокусировки. Это непрактично для тех, кто хочет провести быстрый тест. (Пример этих сложных измерений см. в Burch 1985.)

Необходимо разработать метод, использующий сильные стороны зрения вместо его слабостей, своего рода инструмент, не полагающийся на абсолютную способность глаза определять яркость. Подсказка о методе появляется в *Телескоп любительский*, преподобного Уильяма Ф.А. Эллисона, которая была переиздана в *Книга первая: Изготовление любительских телескопов* (Ингаллс 1976)

По расфокусированным изображениям звезды достаточно легко увидеть, каково состояние коррекции зеркала. Правильно скорректированное зеркало, расфокусированное, даст расширенный диск, равномерно освещенный, если не считать слабых следов дифракционных колец, с чистым, четко очерченным краем и круглым черным пятном в центре. Это черное пятно — тень указки, и оно должно быть *одинакового размера на равных расстояниях внутри и снаружи фокуса*. Если оно больше внутри фокуса, зеркало недостаточно скорректировано. Если оно больше *снаружи*, это слишком исправлено. И много раз в ночи, когда температура была переменной, писатель смотрел в зеркало. *Измениться на всех этих этапах* течение не очень многих минут изменения черного пятна точно соответствовали изменениям термометра... [курсив в оригинале].

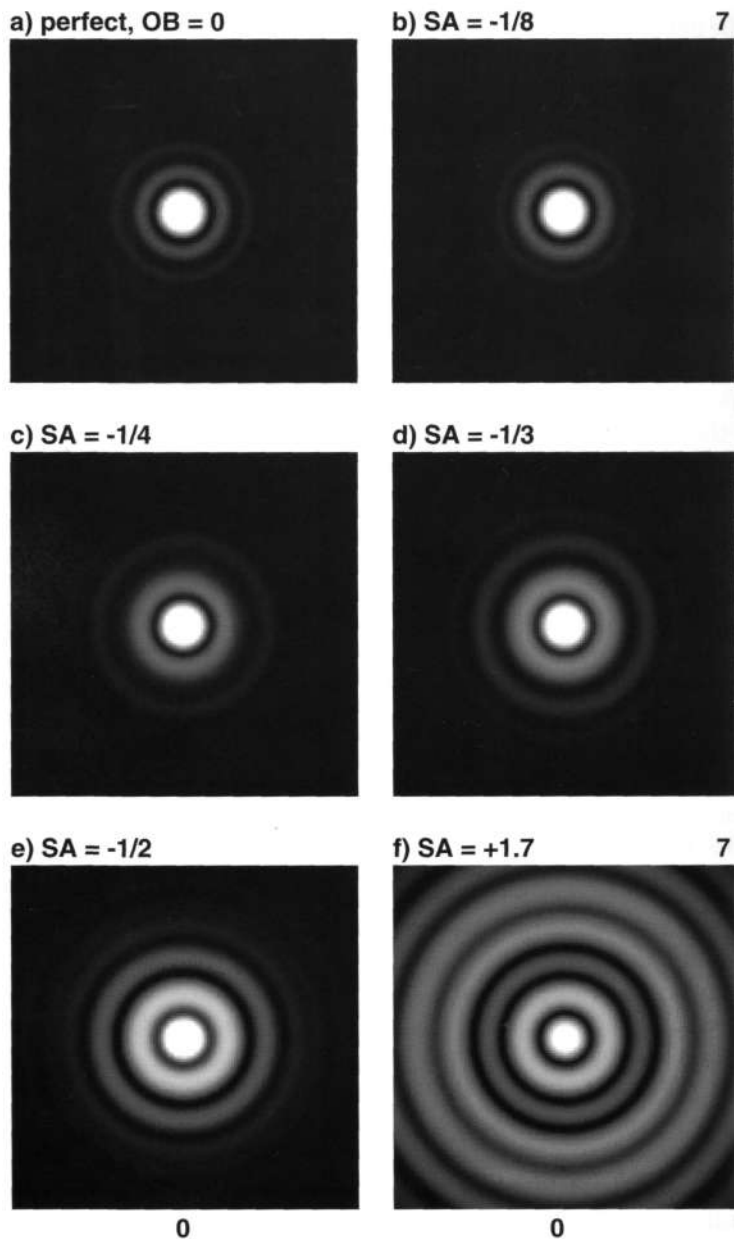


Рис. 10-7. Сфокусированные шаблоны для $0, 1/8, 1/4, 1/3, 1/2$ и $1, 7$ длины волны сферической aberrации низшего порядка. Проем беспрепятственный.

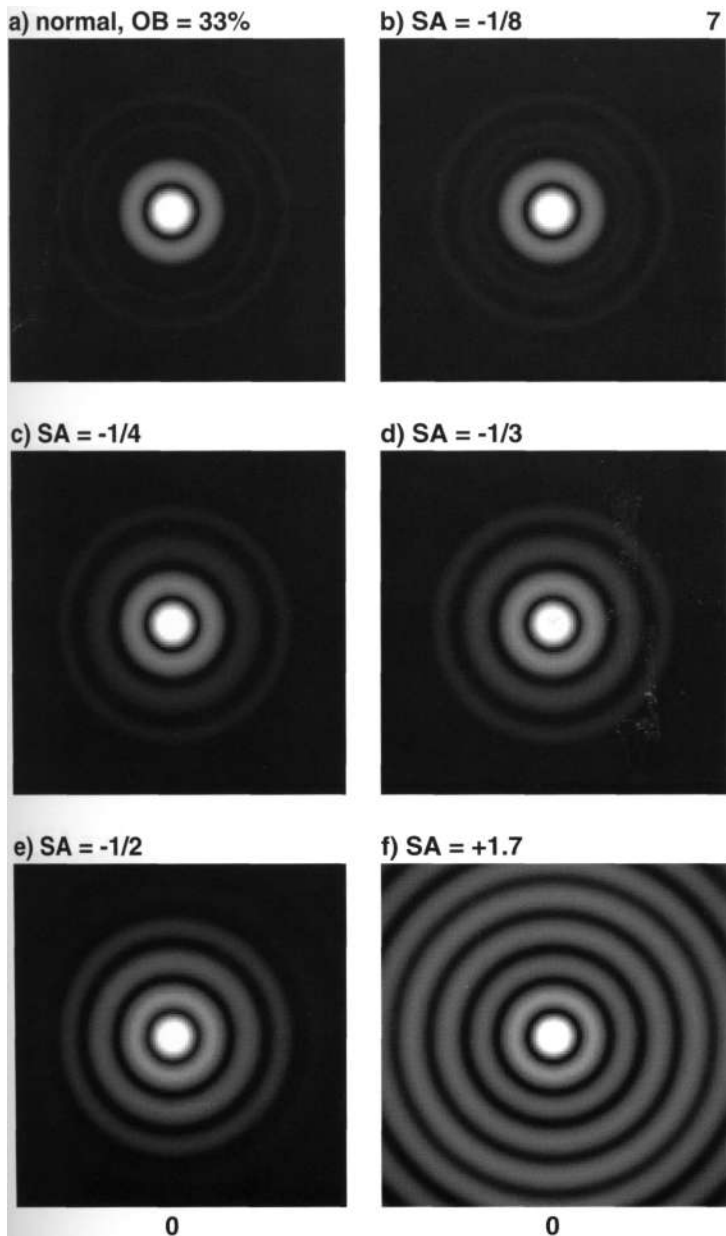


Рис. 10-8. Шаблоны фокусировки для а) 0, б) $1/8$, в) $1/4$, г) $1/3$, д) $1/2$ и ф) $1,7$ длины волны сферической aberrации низшего порядка. Апертура имеет 33% центрированное круглое препятствие.

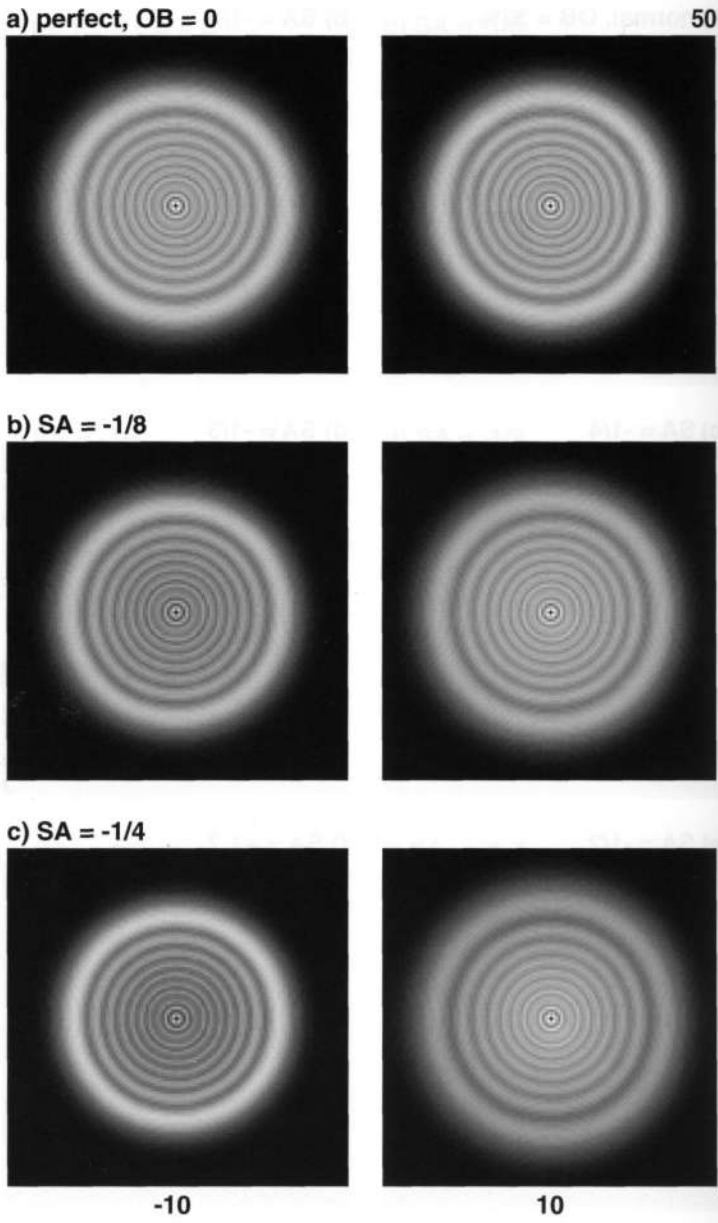


Рис. 10-9. Недоисправленные диафрагмы внутри фокуса (слева) и вне фокуса (справа). Дефокусирующая aberrация ± 10 длин волн, а) 0, б) $1/8$, в) $1/4$, Сферическая aberrация низшего порядка длины волны. Диафрагма беспрепятственная.

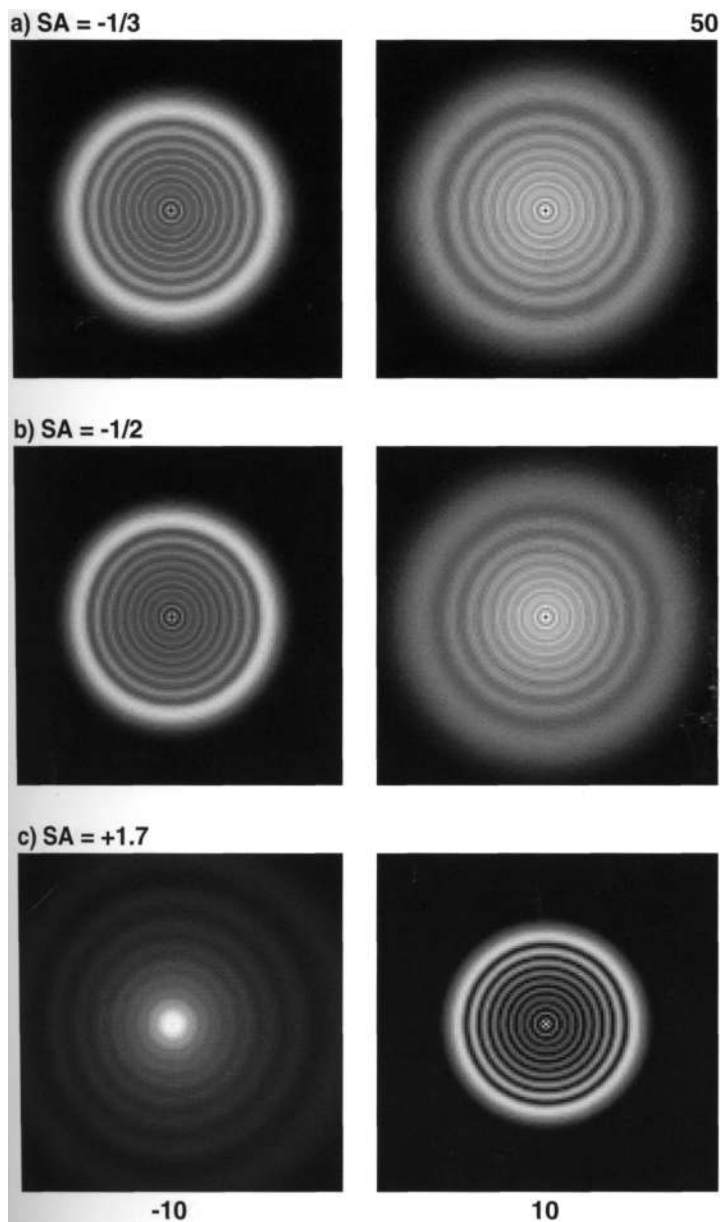
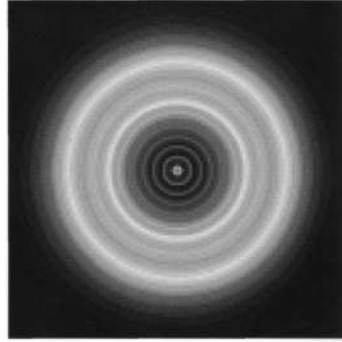
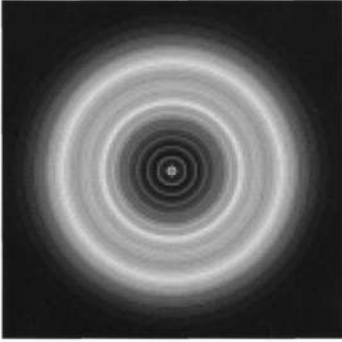
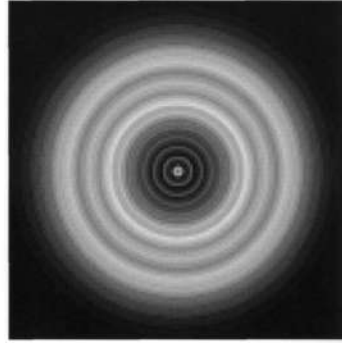
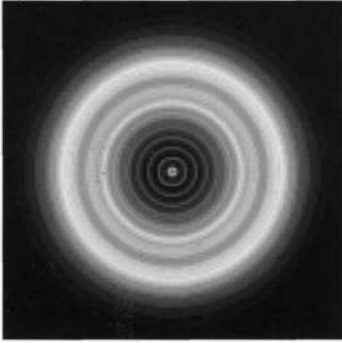


Рис. 10-10. Диафрагмы демонстрируют сильную сферическую aberrацию внутри фокуса (слева) и вне фокуса (справа). Дефокусирующая aberrация ± 10 длин волн, а) $1/3$ длина волны недокорректирована, б) $1/2$ длины волны недокорректировано, в) $1,7$ длины волны перекорректировано. Диафрагма беспрепятственная.

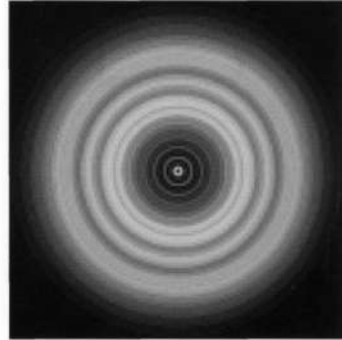
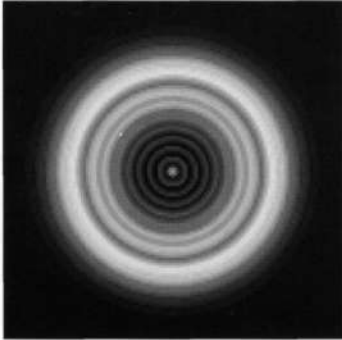
a) SA=0 OB=33%



b) SA = -1/8



c) SA = -1/4



-10

10

Рис. 10-11. Недоискорректированные диафрагмы внутри (слева) и вне фокуса (справа). Дефокусирующая абберация ± 10 длин волн, а) 0, б) $1/8$, в) Сферическая абберация низшего порядка $1/4$ длины волны. Диафрагма закрыта на 33%.

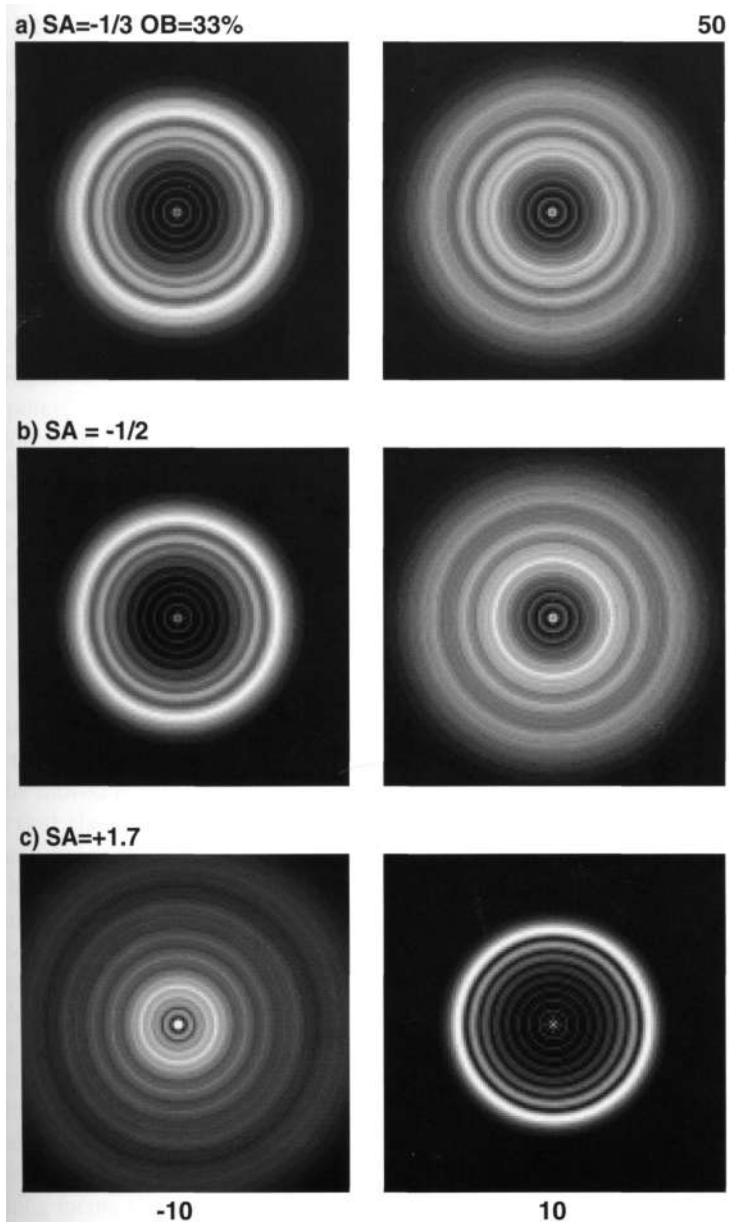


Рис. 10-12. Сильная сферическая aberrация внутри (слева) и вне фокуса (справа). Дефокусирующая aberrация составляет ± 10 длин волн, а) $1/3$ длины волны занижена скорректированной, б) $1/2$ длины волны недокорректировано, в) перекорректировано на 1,7 длины волны. Диафрагма закрыта на 33%.

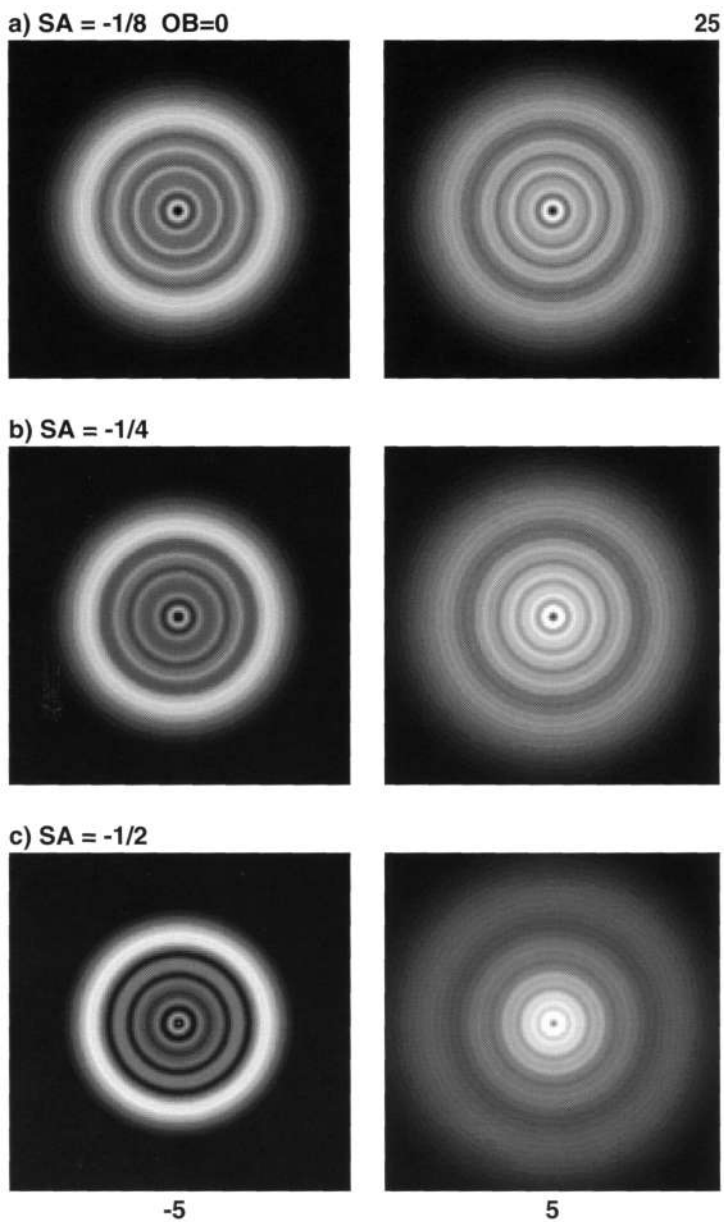


Рис. 10-13: Под исправленными диафрагмами внутри (слева) и снаружи фокуса (справа). Аберрации дефокусируют ± 5 длины волн, а) $1/8$, б) $1/4$, и в) $1/2$ длина волны недокорректирована. Проем беспрепятственный.

Как оказалось, эти комментарии были частью аргумента, который, казалось, критиковал звездное тестирование. Возможно, многие из читателей Эллисона были сбиты с толку этой дискуссией и решили, что звездный тест неадекватен. Однако точка зрения Эллисона была верной. Распространенные в то время зеркала из листового стекла было невозможно проверить в среде с быстро меняющейся температурой. Любой тест в этой ситуации был бы провален.

Современные материалы, используемые в подложках зеркал, гораздо менее склонны к деформации при изменении температуры. Пока температура телескопа близка к температуре окружающей среды, оптика работает достаточно хорошо. Тест надежен при медленно меняющихся внешних температурах.

В любом случае теневое пятно дает испытателям возможность оценить абберацию. На рис. 10-14а показан продольный срез точки фокусировки идеальной апертуры. Объектив или зеркало располагаются слева, направление внешнего фокуса — справа (пояснения к маркировке см. в Приложении Г). За исключением активности пятен вдоль оси, похожих на бусинки на нитке, профиль расфокусировки почти плавный и неинтересный. В 10-14b мы наблюдаем ту же ситуацию с обструкцией 33%. В остальном апертура идеальна, и эта ситуация симметрична.

В темных колбочках, выходящих из центра, тень диагонали кажется вырывающейся из расфокусированного изображения на конечном расстоянии, близком к обеим сторонам фокуса. Поскольку изображение довольно маленькое, яркое пятно в центре задерживает появление центрального препятствия до тех пор, пока абберация дефокусировки не приблизится к двум длинам волн с каждой стороны. (См. главу 5 о преобразовании абберации расфокусировки в движение фокусера.) Окуляр необходимо переместить еще немного, пока пятно не станет четко определенным. Тем не менее, обратите внимание, что точки прорыва идеального зеркала сбалансированы; они находятся на одинаковом расстоянии по обе стороны от фокуса.

Что произойдет, если мы добавим некоторую недостаточную коррекцию к закрытой апертуре? Ответ показывает рис. 10-15.

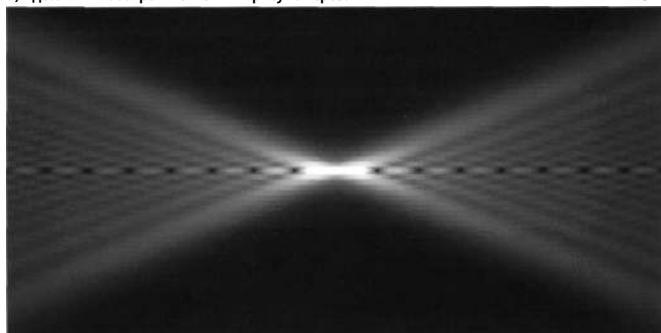
Первый интересный момент заключается в том, что лучшая точка фокусировки немного смещается вперед, а недокоррекция становится все хуже. Абберация была введена как полином Цернике, но эти функции имеют небольшой сдвиг фокуса для закрытых апертур.

Следующая особенность — малый размер диска внутри фокуса по сравнению с внешним. Это состояние частично вызвано смещением фокуса препятствия, но оно заметно на рис. 10-12 выше, где это смещение было исправлено. Для аберрированного волнового фронта не существует уникальной фокусной точки. Приближаясь к фокусу, волновой фронт должен прогибаться и менять форму, проявляясь в разных размерах.

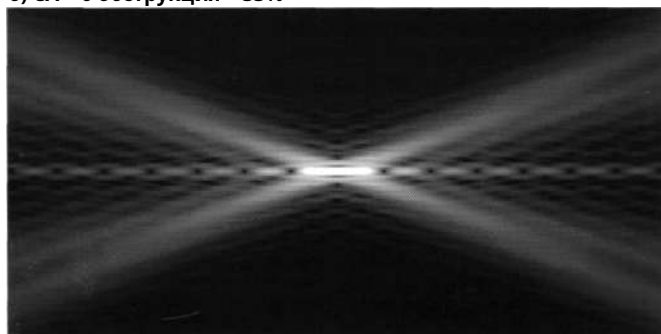
Энергосбережение также играет роль. На рисунках продольных срезов невозможно провести вертикальную линию, не пересекающую освещенную область. Интенсивность никогда не может отключаться повсюду в плоскости среза.

а) идеальный беспрепятственный рисунок среза

32



б) SA = 0 обструкция = 33%



-8

8

Рис. 10-14. Продольный срез через фокус а) круглой открытой апертуры, б) закрытой на 33% апертуры. Ни один из шаблонов не имеет каких-либо aberrаций, связанных с ним. Срез взят из дефокусирующей aberrации—8 длин волн до +8 длин волн. Угловой угол $32\lambda f/D$ соответствует краю трассировки лучей геометрической тени. ±8 дефокусировка длин волн. Таким образом, изображение сжимается до тех пор, пока оно не станет напоминать конус системы $f/1$.

Фактически, если мы очень внимательно отслеживаем полную энергию при любом значении дефокусировки, мы обнаружим, что она равна полной энергии, прошедшей через апертуру. Корочки и узлы — это всего лишь аранжировка. Появление яркого кольца уравнивается темным кольцом, появляющимся в другом месте плоскости среза.

Темные конусы вторичной тени больше не находятся на одинаковом смещении при наличии ошибки коррекции. Это становится более ясным на рисунке 10-16. $1/4$ -диаграмма длин волн, центральное препятствие не проявляется до тех пор, пока оно не будет примерно в два раза дальше от лучшего фокуса.

Два эффекта сговорились с целью компенсировать точку прорыва вторичной тени. Одним из них является скопление энергии вокруг края роговидной формы.

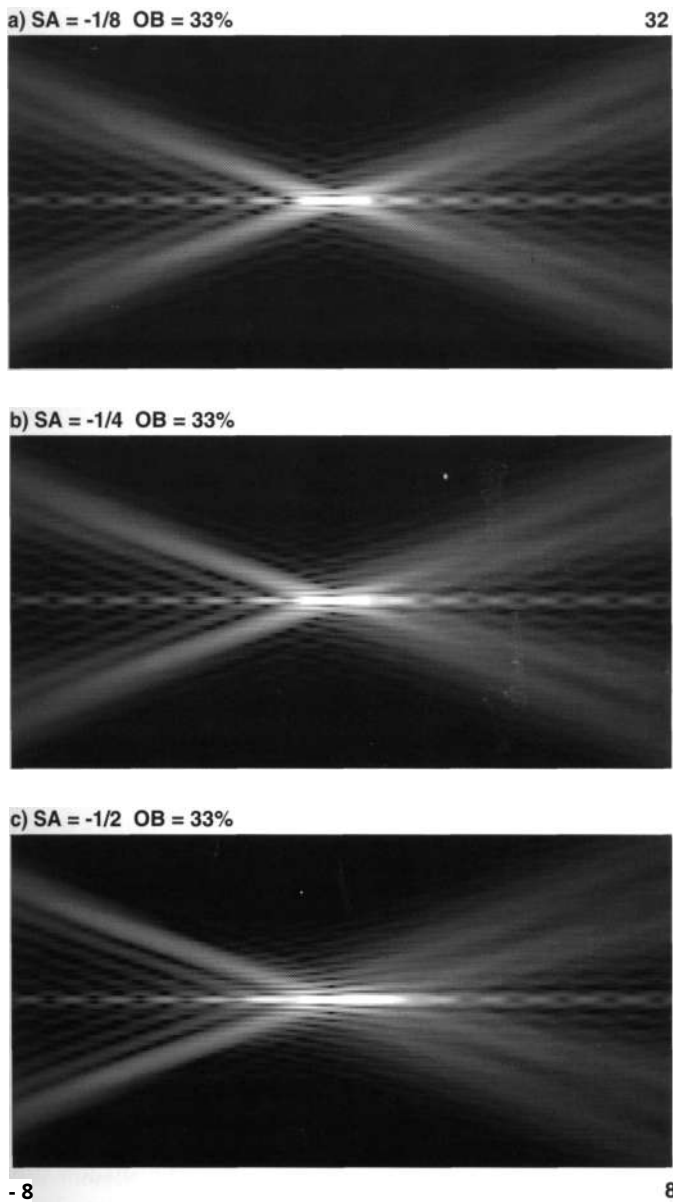


Рис. 10-15: 33% закрытых апертур показывают разное расстояние выхода вторичной тени от центра дифракционного диска. Ошибка исправления - это а) $-1/8$ длина волны, б) $-1/4$ длины волны, и в) $-1/4$ длины волны (все недокорректированы).

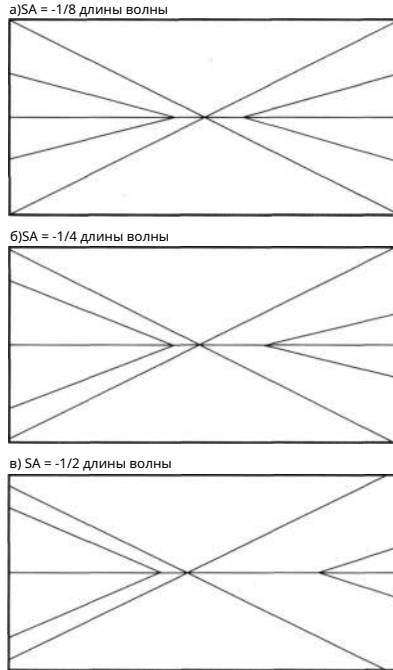


Рис. 10-16. Диаграммы, показывающие общее поведение Рис. 10-15. Расстояние повторного появления вторичной тени существенно отличается, если ошибка коррекции превышает $1/4$ длины волны.

каустика на одной стороне фокуса. Этот яркий выброс энергии из центра позволяет вторичной тени проявиться быстрее. Другой эффект — это скопление энергии в направлении мунштука рупора на другой стороне фокуса. Эта интенсивность заполняет вторичную тень и замедляет ее повторное появления. Только после того, как окуляр пройдет далеко за пределы области каустики, вторичная тень сможет высвободиться.

Можно определить критерий сферической aberrации низкого порядка. Мы потребуем, чтобы соотношение расстояний прорыва было не более 2:1 или 3:1. Конечно, оценка должна выполняться на апертуре, закрытой на 33%. Этот тест отличается от теста, описанного Эллисоном. Он расфокусировал равные расстояния и сравнил размер теней. Здесь мы оценим относительные расстояния по обе стороны от фокуса, на которых четко проявляется тень.

Такой критерий был бы чрезвычайно слабым, если бы он основывался только на одном теоретическом сюжете. Это результат длительного опыта работы с телескопами для исследования звезд, для которых также проводились другие испытания. Эта толерантность не

абсолютный во что бы то ни стало. Повторное появление тени может зависеть от яркости звезды, зрения и примеси других aberrаций. Испытатель должен принять во внимание общее поведение телескопа, прежде чем отбраковывать его только из-за того, что он не прошел только «тест 2:1». Тем не менее, я не видел ни одного зеркала, имеющего //«Ошибка коррекции длины волны (определенная с помощью зонального теста Фуко) дает более низкий коэффициент.

10.6 Тестирование на коррекцию

Этот тест на соотношение 2:1 полезен для других телескопов, помимо рефлекторов. Телескоп должен быть закрыт, даже если у него нет естественной вторичной обмотки. Рефракторы можно искусственно заблокировать, поместив лист бумаги по центру отверстия телескопа.

Однако чтение смещения ни в коем случае не является хорошо контролируемым процессом. Если обструкция составляет 25%, пороговое значение смещается примерно до 3:1. Поскольку большинство ньютоновских рефлекторов имеют препятствия менее 33%, этот тест можно стандартизировать, сделав маску большего размера и прикрепив ее к спине паука. Конечно, врожденная обструкция у большинства Шмидта-Кассегрена уже очень близка к 33%.

Кроме того, на телескопах со средним и высоким фокусным отношением поиск точек прорыва тени от препятствий является гораздо более простым процессом. Гораздо легче читать на телескопах с фокусным расстоянием выше $f/8$. Трудность проведения такой оценки на более быстрых инструментах усугубляется реечными фокусирующими и небольшой глубиной резкости.

Эта процедура, по-видимому, хорошо работает в белом свете, поскольку наличие множества цветов имеет тенденцию размывать минимумы в окружающих дифракционных кольцах или, по крайней мере, делать их менее различимыми. Вторичный появляется во всех цветах, но детали на диске зависят от цвета. Если вы не тестируете рефрактор, попробуйте снять цветной фильтр, чтобы проверить размер пятна.

Источник не должен быть слишком ярким. Поскольку вы рассматриваете изображение близко к фокусу, рассмотрение яркой звезды может перегрузить глаз и затруднить рассмотрение деталей в центре изображения. Если вы проводите тест с искусственным источником, возможно, вам захочется разместить осветитель на большем расстоянии, использовать отражатель меньшего размера или использовать окулярный фильтр нейтральной плотности. Если кажется, что телескоп имеет необычно большое смещение, попробуйте еще раз с более тусклой звездой.

Поведение одного цвета показано на рис. 10-17. Диаграммы идут от слегка внутреннего фокуса вверху слева к несколько дальше от фокуса в правом нижнем углу. Имейте в виду, что эта схема воспроизведена здесь в слишком большом увеличении. Если вам трудно увидеть, где на рис. 10-17 постоянно и сильно появляется тень, поместите страницу на некотором расстоянии. Вы обнаружите, что тень не заметна до тех пор, пока она не выйдет далеко за пределы фокуса.

Тень, по-видимому, имеет эквивалентные центральные впадины с абберацией дефокусировки примерно -1,5 и 3,75.

3,75 по сравнению с 1,5 кажется немного больше оценки 2:1. Но Напомним, что эта точка перехода является трудной. При создании этих шаблонов изображений на бумаге было сделано много компромиссов. Наиболее важным приближением является то, что фигуры не являются самосветящимися. Абсолютную яркость и контрастность изображения также можно было уменьшить, чтобы их можно было печатать на носителе с ограниченным динамическим диапазоном.

Дополнительный эффект дефокусированной сферической абберации продемонстрирован на рис. 10-17. Когда вы расфокусируетесь в сторону колокола каустики (внутренний фокус для недокоррекции), тень вырывается резко и четко. С другой стороны, тень сначала проявляется как мягкое центральное углубление или пупок. Вторичная тень разворачивается или расцветает по мере появления. Точка несомненного появления менее четкая, но все же заметно отличается от другой стороны. Из-за этой неопределенности этот метод не предлагается в качестве метода измерения. Это всего лишь способ обнаружить необычные ошибки коррекции, которые могут вывести из строя ваш телескоп. Момент, когда вам следует задуматься о коррекции вашего телескопа, — это когда отношение превышает 3:1, но вы не можете использовать этот метод отношения для точного измерения сферической абберации.

Если в остальном хороший телескоп не проходит этот тест, у вас может возникнуть мешающая абберация другого типа. Если вы подозреваете, что местоположение прорыва тени дает вам неправильный ответ, перейдите к сравнению моделей с фиксированным расстоянием (как на рис. 10-13), найдя значение расфокусировки в Таблице 5-1. Будьте осторожны с предупреждением Эллисона. Дайте оптике полностью остыть. Пирекс — лучший материал, чем листовое стекло, но его форма не полностью независима от изменения температуры.

10.7. Сферическая абберация высшего порядка.

Иногда коэффициент пренебрегается или не корректируется. В большинстве телескопов эта абберация не имеет большого значения, но для некоторых необычных инструментов она может стать проблемой.

Например, форма пластины корректора Шмидта аналогична кривой четвертого порядка в уравнении. 10.3 с другим количеством разумно выбран для минимизации потенциальных хроматических аббераций. Быстрая сферическая первичная обмотка создает функцию абберации со многими членами в разложении в уравнении. 10.2, но пластина-корректор способна легко корректировать эти члены только до четвертого порядка. Небольшая величина абберации шестого порядка может остаться неисправленной. Различные конструкции линз также могут добавлять незначительное количество «вторичных» сферических аббераций шестого порядка на волновом фронте (Кингслейк

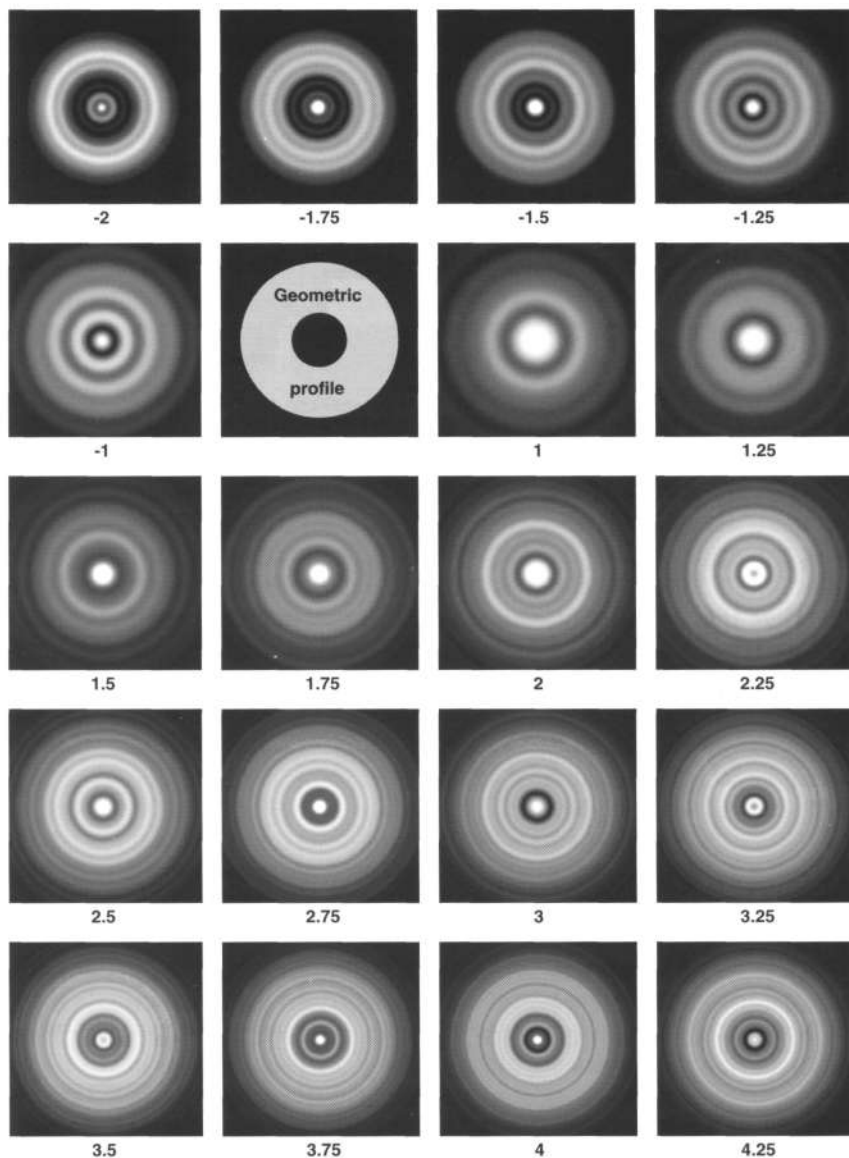


Рис. 10-17. Расфокусированные изображения звезды с закрытой на 33% апертурой и длиной волны $\frac{1}{4}$ под правильным ионом. Каждый кадр увеличивается так, что идеальный геометрический профиль имеет тот же размер, что и маркированный кадр. Таким образом, край находится под углом 10 единиц для 2 длин волн дефокусировки, 20 единиц для 4 длин волн и т. д. Внизу каждого прямоугольника отмечена aberrация дефокусировки в длинах волн.

1978, с. 114).

В большинстве инструментов сферической абберацией более высокого порядка можно смело пренебречь. Тем не менее, в некоторых сверхбыстрых катадиоптиках или сложных конструкциях рефракторов не следует удивляться небольшому количеству аббераций, описанных в следующем разделе.

10.7.1 Звездные тесты сферических аббераций высшего порядка

Аналогичный коэффициент в уравнении 10.3 дает схемы, показанные на рис. 10-18. Подобно ошибке коррекции четвертого порядка, A_4 с противоположным знаком приводит к тому, что эти шаблоны меняются местами в направлении фокуса.

В звездном тесте ошибка выглядит хуже, чем на изображении. Уменьшить коэффициент Штреля до того же значения 0,8, которым он обладает для $\lambda/4$ длины волны сферической абберации низшего порядка, A_4 должно быть увеличено примерно до 0,4 длины волны.

Описание каустики высшего порядка как рога, вытянутого наполовину внутрь себя, помогает объяснить эти сложные закономерности. Шаблоны звездных тестов коррекции ошибок, которые появлялись ранее в этой главе, менялись от яркого внешнего кольца на одной стороне фокуса к нечеткому яркому ядру на другой стороне. Здесь нечеткое яркое ядро появляется по ту же сторону от фокуса, что и дырка в центре (рис. 10-18, —3 длины волны, расфокусированные).

По этой причине сферическую абберацию высокого порядка можно было бы назвать «кольцевой абберацией». Она имеет более чем мимолетное сходство с зональными дефектами, описанными в главе 11. Действительно, эту абберацию можно рассматривать как самую широкую из зональных аббераций.

Конечно, сферические абберации более высокого порядка редко можно увидеть в четко различимой форме. Будучи остаточной абберацией обычного телескопа, ее амплитуда очень мала. Эта абберация обычно заглушается другими эффектами. Я видел небольшое количество только у одного Шмидта-Кассегрена, где темная вторичная тень сочеталась с уменьшающейся яркостью к краю расфокусированного дифракционного диска. Другая сторона фокуса показала противоположное поведение: одновременно появилась легкая вторичная тень и сильное внешнее кольцо. Единственная причина, по которой я смог однозначно увидеть эту небольшую абберацию, заключалась в почти полном отсутствии простой ошибки коррекции в исключительно хорошем приборе.

10.7.2 Фильтрация сферической абберации высшего порядка

График фильтра для сферической абберации высшего порядка показан на рис. 10-19. Четко, $\lambda/4$ длина волны абберации не оказывает серьезного влияния на оптику. Только когда абберация увеличится до 0,4 длины волны, ущерб станет значительным. Наибольшее снижение происходит при

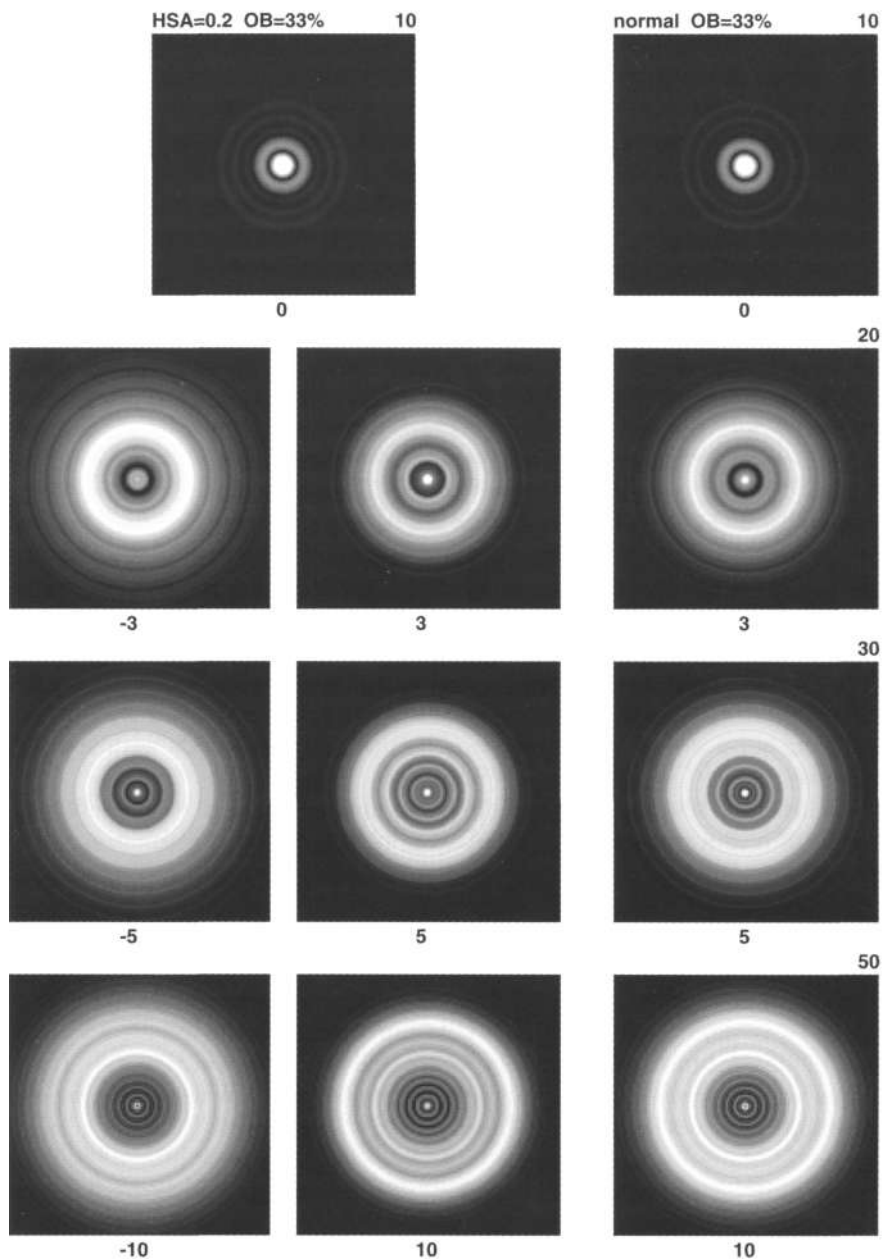


Рис. 10-18. Шаблоны звездного тестирования для $1/5$ длины волны сферической aberrации более высокого порядка при наилучшей фокусировке. Обструкция составляет 33%.

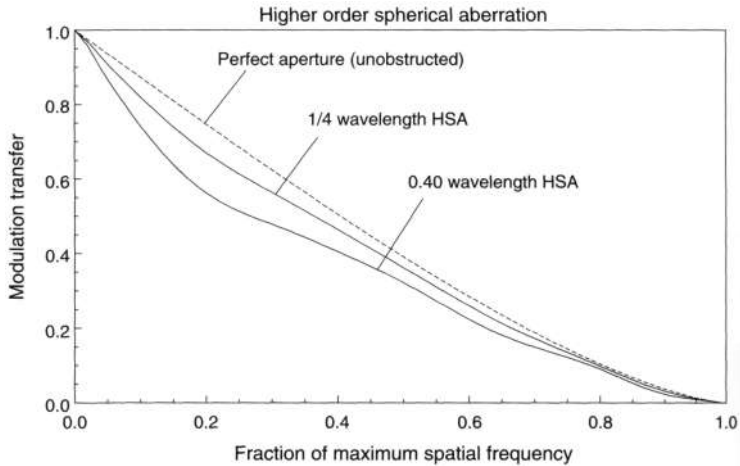


Рис. 10-19. Кривые MTF, вызванные сферической абберацией высшего порядка 0,25 и 0,4 длины волны.

более низкая пространственная частота, чем на рис. 10-5 для сферической абберации низкого порядка. В этом случае падение происходит примерно на 20% от максимальной пространственной частоты вместо 35%. Учитывая, что максимальное разрешение апертуры 200 мм составляет около 0,6 цикла на угловую секунду, эта абберированная система передает детали поверхности, разделенные менее чем 3 угловыми секундами, с пониженным контрастом.

Когда «колено» кривой MTF оказывается левее, это признак более гофрированного вида абберационной функции. Поверхностная ошибка становится более локализованной. По мере того, как оптическая ошибка становится меньше и проходит больше колебаний, соответствующая MTF демонстрирует более резкое снижение на более низких пространственных частотах. Поскольку оптические ошибки становятся более локализованными, MTF на более высоких пространственных частотах также уменьшаются, но не сильно колеблются. Ущерб уже нанесен на более низких пространственных частотах. Однако следует подчеркнуть, что чистая сферическая абберация более высокого порядка такой величины вряд ли будет беспокоить обычные инструменты. Если оптика изготовлена плохо, основная часть аббераций обычно выражается в простой погрешности коррекции четвертого порядка.

10.8 Компактный единый стандарт оптического качества

Как производители потребительских телескопов, так и наблюдатели склонны разделять абберации и препятствия на отдельные категории, рассматривая эти два явления как несравнимые явления. Однако можно легко определить единый стандарт.

чтобы прикрыть их обоих. Он основан на коэффициенте окружающей энергии (или $EER(\theta)$). Обведенное соотношение энергии дает возможность сравнить эти два ухудшения на равной основе.

Вот как рассчитываются такие отношения: сначала мы находим, какая часть энергии точечного источника фокусируется несовершенным телескопом на крошечном круге заданного углового радиуса в фокальной плоскости. Затем это число делится на ту же дробь для получения идеальной незаблокированной апертуры того же диаметра. Например, телескоп с умеренными препятствиями, который также имеет незначительную сферическую аберрацию, окружает 72% своей энергии под определенным углом, а идеальная апертура удерживает 84% своей энергии при том же угловом радиусе. Тогда коэффициент энергии в окружности будет равен $72/84 = 0,86$ под этим углом.

Обратите внимание, что все эти отношения стремятся к единице, когда радиус стремится к бесконечности. Их корректируют при любом простом затемнении апертуры вторичным зеркалом или аподисацией. Ухудшение изображения, вызванное дифракцией, более актуально, чем простая потеря передачи (вспомните парадокс затухания ван де Хюльста). Около половины уменьшения центральной интенсивности вызвано простым затемнением (свет, попадающий на заднюю часть вторичного источника), а половина — разрушительным эффектом дифракции. Наказывать телескоп за эффект, который не увеличивает разброс точек, несправедливо, поэтому его нормализуют. Кроме того, если мы собираемся говорить об абсолютном пропускании, нам также необходимо знать детали покрытий и внутренних отражений. В общем случае они неизвестны, поэтому учет затемнения, вызванного вторичным излучением, является неполным.

Обведенные отношения энергий, представленные на рис. 9-1 и 10-6 — полные кривые. Для одного числа, которое представляет собой критерий качества, необходимо взять $EER(\theta)$ стоимость при определенном значении θ . Возникает вопрос: какой ракурс лучше?

К сожалению, ни один ракурс не является последним словом в оптическом качестве. Мы могли бы выбрать угол (или круг) очень близко к центру изображения или $EER(\theta \rightarrow 0)$. Это число близко к нормированному отношению яркостей в центре дифракционного диска. Фактически оно идентично коэффициенту Штреля в открытых апертурах. Однако EER , снятый вблизи центра изображения, кажется чрезмерно устойчивым к препятствиям, как показывает рис. 9-1. $EER(\theta \rightarrow 0)$ не опускается ниже 0,8 — точки отсечки хорошего оптического качества по коэффициенту Штреля — до тех пор, пока обструкция не превысит 45%. Можно также определить коэффициент качества как EER в пределах круга радиуса $\theta = 1,22\lambda/D$ (уравнение 1.1), или край дифракционного диска Эйри. На рис. 9-1 показано, что значения $EER(1,22)$ значительно снизились и даже начали снова расти.

Несколько произвольно в этой книге будет использоваться угловой радиус $\theta = \lambda/D$, или угловое расстояние, при котором MTF всегда стремится к нулю. Этот угол имеет практическое преимущество, заключающееся в том, что он улавливает закрытые отверстия в их нижних точках на рис. 9-1, а также имеет философское преимущество, заключающееся в том, что он всегда связан с

максимальная пространственная частота графика MTF. Это соотношение будет называться EER(l). На рис. D-2 вы можете видеть, что край рамки находится под углом $1,22\lambda/D$. Таким образом, нарисованный здесь круг будет находиться в темноте между кольцами. Интегрированная область EER(l) находится немного внутри светлого края диска.

EER(l) апертур, смешивающих две оптические проблемы: обструкцию и сферическую абберацию низшего порядка (Цернике), собраны вместе в Таблице 10-1. Мы видим поведение, очень похожее на коэффициент Штреля в свободном верхнем ряду. Четверть длины волны сферической абберации по-прежнему приводит к снижению EER(l) до 0,8. Однако наиболее интересна вторая ось. Можно сравнить коэффициент потерь окруженной энергии в закрытых, но в остальном идеальных апертурах. EER(l) = 0,8 для препятствий размером чуть менее 33% полного диаметра.

Обратите внимание, что препятствия не всегда ухудшают качество. Случай ошибки коррекции в половину длины волны демонстрирует любопытную инверсию: увеличение препятствий приводит к *прикрыть*бедный расчет.

Таблица 10-1
EER(l) для апертур со сферической
абберацией низшего порядка.
Волновой фронт перефокусирован.
Препятствие покрыто лишь на долю диаметра.
Ошибка коррекции пика-впадины
на открытой диафрагме

Препятствие	0	1/8λ	1/6λ	1/5λ	1/4λ	1/3λ	1/2λ
0,00	1,00	0,95	0,91	0,87	0,80	0,67	0,39
0,15	0,95	0,91	0,87	0,84	0,78	0,66	0,41
0,20	0,88	0,84	0,81	0,76	0,65	0,42	0,88
0,25	0,81	0,78	0,74	0,64	0,43	0,82	0,79
0,30	0,75	0,71	0,63	0,44	0,79	0,76	0,74
0,33	0,69	0,61	0,44	0,71	0,69	0,68	0,66
0,40	0,58	0,45	0,58	0,57	0,56	0,56	0,54
0,50	0,44						

Мой личный опыт работы с большим количеством телескопов, имеющих различную величину ошибок коррекции, подсказывает следующие эмпирические оценки. Эти границы обязательно размыты, и «хорошая» точка намеренно выбирается так, чтобы соответствовать коэффициенту Штреля (т. е. 0,8), где оптику условно называют «дифракционно-ограниченной».

1. 0,88 1,00 от отличного до идеального
2. 0,80–0,88 от хорошего до отличного.
3. 0,70–0,80 от плохого до хорошего.

Единственные приемлемые инструменты с EER(l) ниже 0,70 угловых телескопов специального назначения, таких как астрокамеры или телескопы с богатейшим полем зрения. Нет

инструмент, имеющий $\lambda/3$ длина волны ошибки коррекции, даже если она беспрепятственна, достигает этого минимального стандарта. Ни одна апертура с препятствием чуть больше 40%, даже если она рассчитана идеально, никогда не встретит его.

10.9 Допустимые ошибки

Все телескопы выполнены с некоторой сферической аберрацией. Например, идеальный ньютоновский параболаид — это недостижимая цель между бесконечным числом вытянутых сфероидов и гиперboloидов. Вопрос в том, пострадает ли телескоп от нагрузки. Когда EER(l) превышает 0,88 или около того, сферическая аберрация становится приятно малой, и оптику можно по праву назвать «идеальной».

В главе 3 мы видели, как функции передачи модуляции складываются индивидуально. Большинство телескопов с препятствиями уже балансируют на грани. Чтобы их подтолкнуть, нужно совсем немного. Следуя такой логике, мы должны быть нетерпимы к любой корректирующей ошибке, но такое отношение нереалистично.

Оптика коммерческих телескопов всегда корректируется с допуском около $1/4$ длины волны. Способ определения точности изменился, но производители коммерческих телескопов по-прежнему изготавливают ту же самую точность. $\lambda/4$ Длинноволновая оптика у них всегда была.

Давайте признаем простой факт. Создание целей с более высокой точностью, чем $\lambda/4$ Длина волны дорогая. Масштабирование цены с качеством аналогично масштабированию цены с диаметром. Постепенное улучшение точности поверхности обходится гораздо дороже, поскольку мы платим не за стекло, а за драгоценное время оптика. Хорошо это или плохо (обычно хуже), но покупатели используют цену как сильный решающий фактор.

Действительно ли необходима большая точность? В неофициальных тестах телескоп $\lambda/4$ Было обнаружено, что ошибку коррекции длины волны трудно отличить от очень хорошего телескопа, если зрение не превосходно и наблюдатель не опытен (Seravolo и др. 1992 год; также см. главу 15). Для большинства людей, наблюдающих при среднем небе, $\lambda/4$ -погрешность коррекции длины волны представляет собой приемлемый компромисс между качеством и ценой оптики.

В предыдущем разделе мы определили апертуры с коэффициентом окружающей энергии более 0,88 как отличные. Мы видим, что это обозначение применимо только к верхнему левому углу Таблицы 10-1, т. е. к препятствиям менее 25 % или ошибкам коррекции менее $\lambda/5$ длина волны. Обратите внимание, что апертура, закрытая на 25 %, имеет только $\lambda/6$ длина волны ошибки коррекции все еще «хороша» и составляет 0,81, но закрытая апертура на 15% $\lambda/4$ Ошибка 4-х длин волн ниже порогового значения 0,78. Урок ясен. Точный расчет позволяет телескопу избежать других трудностей.

Лично я считаю изображения оптики, прижатой к пределу Рэля, слишком мягкими. Однако из протестированных мной телескопов большинство

те, которые явно не очень хорошо себя показали в небе, были намного хуже предела Рэлея. Ошибка коррекции в четверть длины волны едва ли приемлема, если это единственная существенная проблема. При разумной преграде в 25% такая апертура имеет $EER(l) = 0,74$ и имеет передаточную функцию лучше, чем идеальная, беспрепятственная апертура $1/2k1/3$ его размера. Даже при наличии оптических проблем такого масштаба 6-дюймовый рефлектор с диафрагмой $f/8$ по крайней мере не уступает идеальному 3-4-дюймовому апохроматическому рефрактору. На некоторых пространственных частотах оно лучше.

Глава 11

Круглые зоны и загнутые края

В этой главе обсуждаются зональные дефекты и распространенный тип зональной ошибки — перевернутый фронт. В нем будут сформулированы четыре основных момента:

1. В зеркалах любительского размера внутренние зоны редко бывают настолько большими, чтобы создавать проблемы.
2. Зональные дефекты можно обнаружить путем большей, чем обычно, дефокусировки.
3. Перевернутый край является постоянной проблемой, которая приводит к худшему контрасту, чем меньшая апертура внутри перевернутого кольца.
4. Узкие загнутые края можно обработать, замаскировав или покрасив края.

11.1 Причины зональных дефектов

Зоны представляют собой небольшие округлые рифления на полированной поверхности стекла. Неправильное использование быстрополирующих материалов может привести к образованию зон в оптических элементах. Например, притир обычно прижимается к оптической детали для достижения однородности полировки. Если прижимается слишком мало или часть притира во время прессования выступает вперед, части полировального устройства могут проходить по оптической детали с большим давлением, чем остальные. Поскольку притир и направление хода вращаются относительно зеркала, это неравномерное давление создает траншею вокруг определенного радиуса зеркала. Многие другие механизмы также могут приводить к зональным дефектам. При использовании слишком короткого хода хорошее статистическое усреднение двух поверхностей не происходит. Создание круга с центрированным узором часто приводит к обилию тонких колец. Если кусок хрупкой смолы отломится и застрянет под остальной частью притира, в течение следующих нескольких минут в зеркале останется борозда, пока кусок не затолкнется обратно в притир.

Однако эти причины незначительны по сравнению с основной причиной возникновения зон. Быстрые асферические зеркала требуют использования полировальных машин меньшего размера. Старый стиль оптической работы (распространенный во времена длиннофокусных зеркал) предполагал использование двух одинаковых дисков. Производители телескопов немного изменили ход на несколько минут, но по-прежнему использовали притир одинакового диаметра для достижения асферической фигуры. К сожалению, этот метод не работает на зеркалах с низким фокусным соотношением. Сфера настолько отличается от правильной формы, что изготовителю приходится бороться за правильное соответствие. Круг одинакового размера никогда не достигнет правильной формы. Естественная тенденция к статистическому усреднению будет продолжать тянуть кривую обратно к сфере. Кроме того, нахлсты полного диаметра являются громоздкими, когда оптическая часть велика, независимо от ее фокусного расстояния.

Оптик выбирает притир меньшего диаметра, обычно примерно в половину размера обрабатываемого диска (если только оптическая деталь не очень большая — тогда она еще меньше). Добиться асферической формы можно, просто потирая центр диска больше, чем снаружи. Однако использовать меньший круг опасно. Оптик должен обеспечить искусственную случайность на полировальном станке, чтобы не допустить, чтобы неестественная точность механизма рыла траншеи с фиксированными радиусами и, как следствие, оставляла выступы на других радиусах. Частично обработанную поверхность необходимо зашлифовать или загладить.

К счастью, внутренние зоны большинства коммерческих зеркал можно обнаружить при чувствительных стендовых испытаниях, но обычно они настолько малы, что не видны в окуляр. Наиболее распространенным является небольшое углубление или сосок в центре, ошибка, которая в значительной степени скрыта вторичным зеркалом. Оставляя эту ошибку без лечения, оптик экономит время и деньги, игнорируя ошибку, которая не будет освещена. (Центральная зона показана на рис. А-3.)

Другой распространенный тип внутренней зоны состоит из одного или нескольких призрачно тонких колец, появляющихся примерно на полпути. Их обычно можно увидеть в тесте Фуко, когда фигура поверхности очень близка к сфере, но такая ошибка носит лишь косметический характер. Легкий звон свидетельствует о том, что смешивание проходит хорошо.

С другой стороны, если производитель поторопится и тестирование окажется неудовлетворительным, в зеркале может остаться серьезная зона. Одна из форм внутреннего зонального дефекта имеет два конкурирующих радиуса кривизны — один внутри зоны, другой вне зоны. Это условие может быть более разрушительным для изображения, чем свет, рассеянный вблизи самой зоны. Свет, отклоненный от непосредственной области зоны, будет выглядеть как рассеянное свечение, если зона достаточно резкая, но эти большие области зеркала по обе стороны от зоны направляют большое количество света на мешающие фокусные точки. Они покрывают достаточную площадь, чтобы свет мог попасть на два плотных диска на разных фокусных расстояниях.

Самая изнурительная форма зоны — это повернутая кромка. Это может произойти даже из-за притира на полный диаметр. Это вызвано чрезмерным износом кромки

диск во время полировки. Если приложить слишком большое давление, когда инструмент балансирует на краю оптической поверхности, или если притир не поддерживается в хорошем соответствии с формой обрабатываемого диска, это может привести к перекоосу края (Texegeau 1984). Повернутая кромка также является проблемой, связанной с раскачиванием зеркального диска во время полировки.

Загнутый край, поскольку происходит на самой периферии оптической поверхности, не ограничен по амплитуде. Внутренние зоны являются временными злоумышленниками. Если поддерживается хороший контакт между зеркалом и инструментом и ход не слишком короткий, усредняющий эффект множества движений под разными углами в конечном итоге приведет к усреднению зоны. Оно будет автоматически смешано.

С другой стороны, загнутый край возникает из-за плохих привычек в расчетах или неправильного использования материалов. Как только это началось, причина обычно не исчезает. Это просто продолжается или даже становится хуже. Загнутые края обычно глубокие, а поскольку край находится по периметру оптики, он покрывает удивительно большую часть площади поверхности апертуры. На зону с загнутым краем 5% попадает около 10% света, падающего на апертуру.

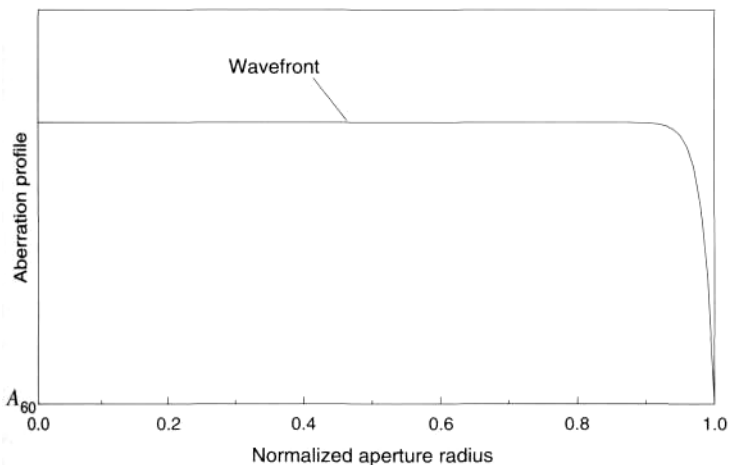


Рис. 11-1. Загнутый край моделируется членом 60-го порядка уравнения. 11.1.

Зональная aberrация связана с выражением для общей сферической aberrации. Помните, что в уравнение волнового фронта входят такие члены, как

$$W(\rho) = \text{константа} + \text{фокусный термин} + A_4\rho^4 + A_6\rho^6 + A_8\rho^8 + A_{10}\rho^{10} + \dots \quad (11.1)$$

Обычно для глобальных ошибок расчета коэффициент $r_{\text{самой}}$ самой большой, с меньшим коэффициентом $r_{\text{е}}$. Все остальные члены значительно меньше. Но зона — это особый случай, когда вносят свой вклад один или несколько членов более высокого порядка. Зона подобна переключателю, который включает сферическую абберацию очень высокого порядка, внезапно пробуждая ошибки, которые лучше было оставить спящими.

Простой пример показан на рис. 11-1. Повернутый край моделируется как термин — *Аборво*. В 60-м ордене нет ничего особенного. Аналогичные результаты были бы получены для 58-го или 62-го порядка.

Внутренние зоны устроены сложнее. Они представляют собой комбинации многих терминов высокого порядка. Широкие зоны описываются более низкими порядками, чем резкие.

11.2 Внутренние зоны

Что-то следует подчеркнуть в начале, чтобы не напугать читателя. Внутренние зональные дефекты любительской оптики редко представляют собой нечто большее, чем косметические дефекты. Хотя они являются обычным явлением в течение коротких периодов изготовления, достаточно тщательной работы, чтобы их уменьшить. Мало кто из оптиков выпустит маленькое зеркало со значительной внутренней зоной. Однако большие зеркала обычно изображаются лицевой стороной вверх, а полировальные круги намного меньше их диаметра. Такая оптика часто показывает стойкие зоны. Эти зеркала требуют более тщательной оценки, чтобы определить, незначительны ли их зональные дефекты.

Здесь рассмотрены два типа внутренних зон. Первый представляет собой узкую траншею, в которой деформация изолирована или не сохраняется на остальной поверхности. Огромная оптика обсерваторий часто страдает от такого типа зон, поскольку поверхность обрабатывается очень маленькими полировщиками. Обычно оптики, работающие с большой оптикой, не дураки и не допускают, чтобы условия, вызывающие появление этих зон, сохранялись долго. Тем не менее на тестовых фотографиях с больших зеркал иногда появляются скелетные остатки зональных борозд.

Модель звездного теста в главе 2 была рассчитана на основе такого //зона траншеи длины волны. Он был смоделирован как узкий провал функции Гаусса в плоском зеркале. Конкретные внефокальные паттерны, показанные на рис. 2-9, имели абберации дефокусировки в 20 длин волн. Общая особенность звездного теста для зон заключается в том, что нужно отойти дальше от фокуса, чтобы хорошо увидеть эффект зон.

Зона, обычно получаемая при изготовлении небольших зеркал, имеет профиль, похожий на букву «S» или «Z», и здесь называется «S-зоной». Зона сохраняется после вычитания из волнового фронта глобальных ошибок расчета ниже шестого порядка. Эта зона может иметь разные радиусы по обе стороны от самого крутого склона.

11.2.1 Аберрационная функция S-зон

Зоны можно описать линейными комбинациями многих членов сферической аберрации, но этот метод несколько громоздок. Вместо этого зона здесь указывается тремя параметрами: амплитудой, шириной и радиусом. Затем оптическая поверхность делится на три области, и поверхность строится путем подгонки кубических полиномов через точки, определяемые этими тремя параметрами. На границе каждой области наклон волнового фронта равен нулю. На рисунке 11-2 показана узкая зона радиусом 40%. Внутри зоны находится чашеобразное плато, окруженное неглубокой тарелкой. Менее очевидна немного другая кривизна этих областей.

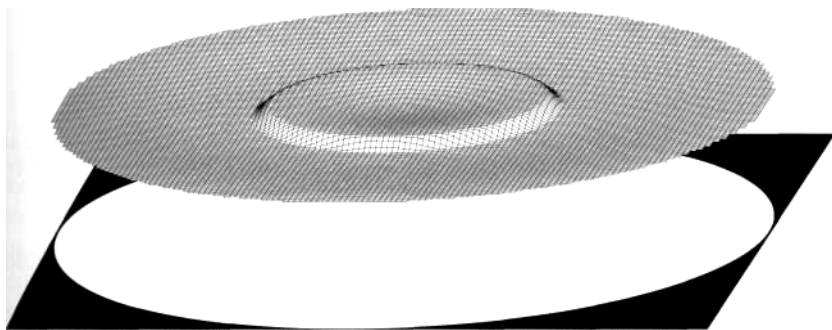


Рис. 11-2. Резкая S-зона на радиусе 40% апертуры. Она делит поверхность на две широкие области с разным радиусом кривизны, а также образует быстро наклоненный гребень рассеивания..

11.2.2 Фильтрация S-зон

Внутренние зоны имеют два характерных масштаба. Свет, дифрагированный вблизи самой зоны, рассеивается в широкое нечеткое гало, поэтому можно ожидать, что передаточная функция модуляции должна быстро падать на низких пространственных частотах. Когда такие зоны имеют большой диаметр, более или менее похожий на большое центральное препятствие, MTF колеблется аналогичным образом на более высоких пространственных частотах.

Поведение MTF соответствует обоим предсказаниям на рис. 11-3 для двух радиусов и двух амплитуд. Один радиус — это всего лишь зона 40 %, описанная в последнем разделе. Другой — тот же зональный дефект, смещенный до центрирования 70% радиуса. Обе зоны построены с суммарными аберрациями $\lambda/8$ и $\lambda/4$ длины волны, и обе зоны имеют ширину, равную 0,1 радиуса апертуры. $\lambda/4$ зоны длин волн дают немного лучший коэффициент интенсивности Штреля, чем значение 0,8, которое соответствует шкале Рэлея. $\lambda/4$ предел длины волны

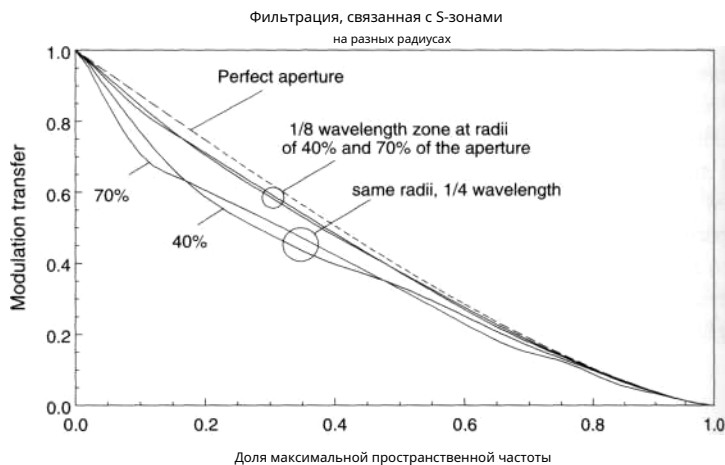


Рис. 11-3. Функции передачи модуляции для одной зоны. Кривые МТФ являются для двух значений зональной aberrации ($1/4$ длины волны и $1/8$ длины волны) и двух зональных радиусов (0,7 и 0,4 полной апертуры). Проем беспрепятственный.

для сферической aberrации. $1/8$ -Зоны амплитуды длины волны находятся в пределах допуска на отношение Штреля 0,8.

Незначительные покачивания МПД зонального дефекта на высоких пространственных частотах испытателя мало волнуют. Более неприятным является резкое падение на низкой пространственной частоте. Именно об этом ухудшении говорили Данжон и Кудер, когда проводили различие между наклоном дефекта и его амплитудой (упоминалось в главе 1). Гладкая поверхность — это разница между просто адекватной оптикой и теми редкими приборами, от которых у наблюдателя захватывает дух.

Обратите внимание на еще одну особенность этих графиков. Зона, появляющаяся на 70% апертуры, намного хуже, чем зона равной глубины, появляющаяся ближе к центру. На низких пространственных частотах контраст падает более резко для зоны большего радиуса. Снижение производительности в этом случае зависит исключительно от того, какую площадь покрывает дефект.

Конечно, внутренние зональные дефекты плохо описываются ошибкой размаха волнового фронта. Среднеквадратичное отклонение — гораздо лучший способ охарактеризовать зоны. Зоны недопустимы, если их среднеквадратичное отклонение $1/14$ длину волны, что примерно соответствует $1/4$ кривая длины волны на рис. 11-3 на радиусе 0,7. Это отклонение намного хуже, чем мог бы допустить любой уважающий себя оптик. При отклонениях вдвое меньше МТФ показывает лишь небольшой спад. Такая величина aberrации приемлема.

11.2.3. Обнаружение внутренних зон звезды. Тест

В своей работе 1891 года по исследованию звезд Тейлор дал краткое описание того, как он обнаружил зону в рефракторе:

Чтобы обнаружить такую зональную aberrацию, которая вызвана несовершенным изображением одной или нескольких поверхностей, лучше всего направить телескоп на очень яркую звезду, используя умеренно высокое увеличение, и вводить и выводить из фокуса, как раньше. , только лучше всего отбирать до тех пор, пока не удастся насчитать от 8 до 20 интерференционных колец, ибо в таких условиях легче всего обнаружить неравномерный зональный эффект... Считая от края внутрь, можно заметить, например, что внешнее кольцо бедное и слабое, в то время как следующие одно или два кажутся непропорционально сильными, следующие два или три слабы, тогда как те, что находятся в центре, снова сильны... (Тейлор 1983).

Хотя Тейлор писал о рефракторах и имел в виду более плавные деформации, смоделированные здесь, он описал два основных метода обнаружения зон. Во-первых, яркие звезды используются для проверки зональных дефектов. Во-вторых, телескоп расфокусирован дальше, чем рекомендуется для обнаружения других типов aberrаций. Расфокусировка на больших расстояниях особенно удобна, поскольку уменьшает влияние других aberrаций почти до точки исчезновения. Кроме того, поскольку свет вблизи фокуса безнадежно перемешан, эта зона не имеет тенденции изолировать себя от остальной части дифракционной структуры.

Звездные тесты для беспрепятственной оптики с S-зоной на 40% радиуса апертуры и λ . Суммарные 8-волновые aberrации на волновом фронте показаны на рис. 11-4 (соответствуют одной кривой диаграммы MTF на рис. 11-3). Дефокусирующие aberrации относятся к 10 и 20 длинам волн, тогда как большинство других aberrаций, встречающихся в этой книге, изображены в пределах 8 или 10 длин волн. Телескоп далеко не в фокусе, но все же эта зона хорошо видна.

Зона наиболее отчетлива на диапазоне ± 20 длин волн, где она проявляется вблизи собственного радиуса, но даже здесь она имеет некоторые аномальные особенности. Прежде чем достичь пика, он опускается. Фактически, зона, по-видимому, расположена в точке пересечения очень яркого кольца и вдавненного кольца, предположительно потому, что это S-зона. Зоны желоба или холма расположены по правильному радиусу, но заключены в скобки кольцами противоположной яркости. Темная область всегда ассоциируется со светлой, потому что необходимо сохранять энергию. Энергию, которая делает одно кольцо ярче, всегда необходимо черпать из ближайшего кольца.

Картинки дефокусирующей aberrации ± 10 длин волн демонстрируют еще одно интересное зональное свойство, замеченное Тейлором, — картину на 10 длинах волн.

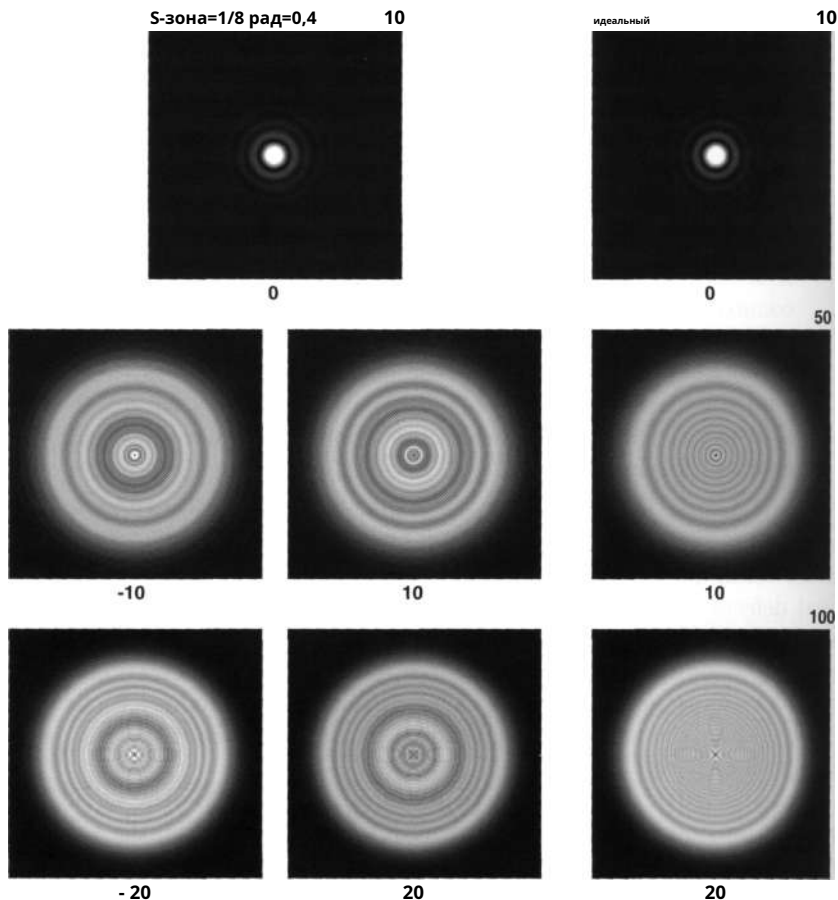


Рис. 11-4. Диаграммы звездного теста для S-зоны радиусом 40% с амплитудой $1/8$ длины волны. Идеальные выкройки находятся в столбце справа. Проем беспрепятственный.

кажется, является дополнением к модели —10 длин волн. Разворот не идеален, а лишь приближителен. На участках диска, удаленных от края и близких к радиусу зоны, рисунок кажется негативом узора по другую сторону фокуса.

Рисунок в фокусе указывает на то, что такая зона больше напугает тестировщика, чем испортит изображение. Коэффициент Штреля снижается лишь примерно до 0,95, что вполне соответствует допуску для превосходной оптики.

Другая модель представлена на рис. 11-5. На этот раз зона перемещена на радиус 0,7 полной апертуры, а апертура закрыта на 20%. Здесь мы видим действительно сложное поведение. Локализованные эффекты

абберации еще не отделились от изображения при дефокусировке 20 длин волн. Этот факт учит чему-то важному в определении зон. Зоны легко обнаружить, но их радиус и количество определить сложно. Максимум, что мы можем сказать, если не видно очень четкого разделения, — это то, что на поверхности имеются зоны.

В случайных разговорах можно услышать, как звездные тестеры уверенно говорят о местонахождении зон, говоря что-то вроде: «Я обнаружил две зоны, одну на 50%, а другую на 75% радиуса». Эти утверждения предполагают, что структура рисунка расфокусировки совершенно несмешанная, что, вероятно, неверно. Рисунок 11-5 представляет собой расчетную диаграмму направленности одной зоны известного радиуса, однако в этой апертуре, похоже, присутствует множество зон. Множественный звон будет выделяться на 30 или 40 длинах волн, вызывая дефокусирующую абберацию (не показана), но неясным образом. Поскольку эта зона находится очень далеко от апертуры, она мешает постоянному темному кольцу внутри яркого внешнего кольца.

Из обоих рисунков можно сделать окончательный вывод. 11-4 и 11-5. Звездный тест почти слишком чувствителен к внутренним зональным абберациям. Фильтрация общей абберации длины волны в любой ситуации мягкая. Рисунок в фокусе почти такой же, как у неабберированной оптики. Тем не менее, зоны выглядят суровыми, когда они расфокусированы. Если вы едва сможете обнаружить наличие зон с расфокусированной оптикой, то бояться вам нечего. Они не повредят сфокусированное изображение в большинстве ситуаций наблюдения в темном поле. Фактически, я никогда не видел такой плохой зоны, как та, что изображена на рис. 11-5.

11.3 Загнутые края

Загнутый край достаточно распространен как в любительских, так и в коммерческих зеркалах, хотя обычно он принимает разные формы. В зеркалах любительского изготовления он часто широкий и неглубокий, начинается в радиусе где-то 80% или 90% полной апертуры и постепенно скатывается к краю. У коммерческих зеркал загнутый край обычно находится прямо по периметру, но он более крутой. Причины этой дихотомии неясны. Возможно, любители, которые обычно работают вручную, способны оказывать меньшее давление на зеркало, а может быть, они используют смолу с другими рабочими характеристиками. Коммерческие зеркала, скорее всего, отполированы твердым слоем и, следовательно, не склонны к переворачиванию кромок, но машины способны прикладывать к инструментам огромную силу.

Для целей этой главы, которая посвящена не столько изготовлению зеркал, сколько проверке зеркал наблюдателями, описываемый тип заточенной кромки является узким. Широкие загнутые края будут относиться к зонам, оказавшимся на границе зеркала. Их поведение в лучшем случае фокусировки похоже на простую сферическую гиперкоррекцию. Поскольку низшие порядки сферической абберации (4-й и 6-й) уже обсуждались в главе 10, это

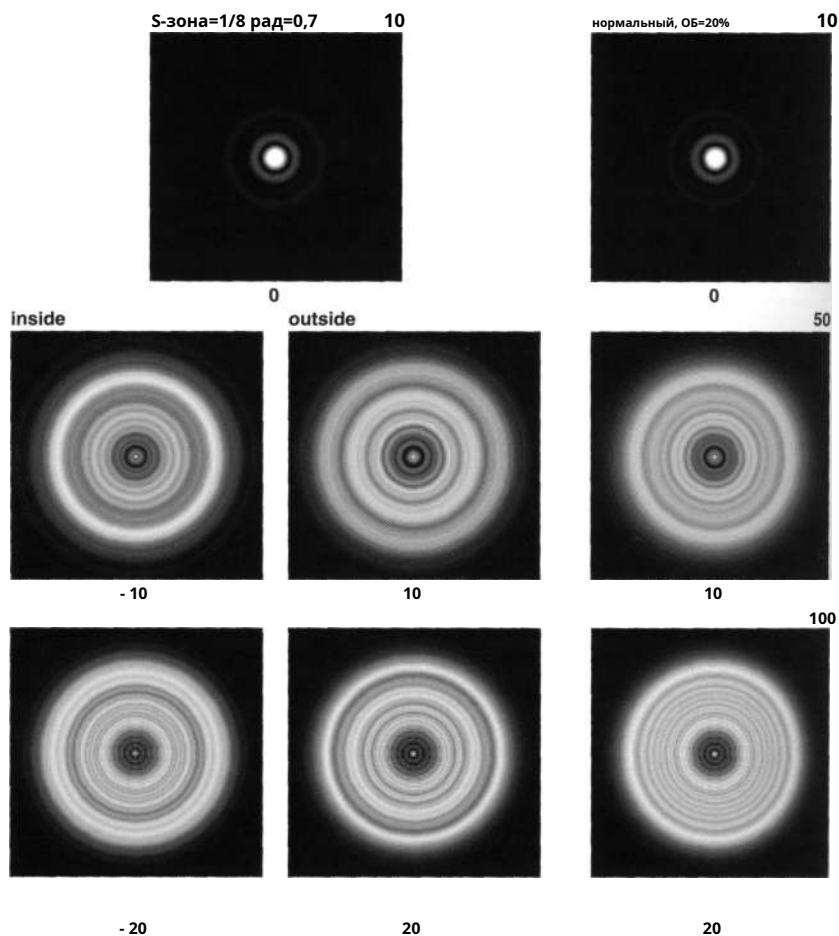


Рис. 11-5. Звездные тесты S-зоны на 70% радиуса диска. Полная абберрация $1/8$ длины волн. Нормальные шаблоны находятся в столбце справа.

раздел будет сосредоточен на другом предельном случае.

Загнутый край, кажется, более распространен в быстрых, больших или тонких зеркалах, но это правило не является жестким. Он появляется достаточно часто в медленной, маленькой или толстой оптике. Один автор, занимающийся изготовлением зеркал, советует, чтобы при проектировании больших телескопов с тонкими зеркалами наблюдатели планировали большую поверхность, чем можно было бы ожидать в конечном инструменте. Тогда они смогут весело (и несколько фаталистично) замаскировать дальний край (Kestner 1981).

11.3.1 Функция аберрации

Опять же, перевернутый край может быть обработан с помощью члена очень высокого порядка в уравнении сферической аберрации. Здесь мы выбираем гораздо более простой путь. Гораздо удобнее просто позволить зеркалу распрямиться до определенного радиуса, а затем начать квадратичное падение к краю. Квадратичный характер нисходящей тенденции не основан на каких-либо физических доказательствах или теории того, как эти края располагаются на оптических поверхностях. Оно выбирается произвольно. Были опробованы другие способы описания спуска, и результаты особо не изменились.

На рис. 11-6 показан такой загнутый край, как стол с плитусом. Эта цифра не совсем точная. Лучшая фокусировка на закругленных краях требует, чтобы внутренняя плоская область превратилась в очень неглубокую чашу. Функция аберрации, которая фактически использовалась для генерации паттернов, была модифицирована так, чтобы иметь минимальную дисперсию.

11.3.2 MTF Turned Edge

Фильтрация перевернутого фронта показана на рис. 11-7. Эта аберрация очень компактна и сильно наклонена, поэтому неудивительно, что свет, дифрагированный от края, отклоняется далеко от центра. MTF быстро падает, отражая повреждение широко расположенных полосок цели с низкой пространственной частотой. На другом конце шкалы сохранение контраста на высокой пространственной частоте очень похоже на сохранение контраста при меньшей апертуре с радиусом, равным размеру неперевернутой области. Свет распространяется так далеко от центрального ядра, что не мешает сфокусированному пятну, но внешняя часть апертуры не вносит существенного вклада в изображение. Телескоп с загнутой кромкой ведет себя не лучше, чем телескоп меньшего размера. Хуже того, на низких пространственных частотах паразитный свет из краевой области фактически вредит изображению.

11.3.3 Образец изображения загнутого края

На рис. 11-8 показан фокус на загнутой кромке предыдущей секции. Поскольку эта аберрация гораздо чаще встречается у рефлекторов, чем у рефракторов, для реалистичности было добавлено умеренное препятствие.

По полю зрения внутри фокуса распространяется диффузное свечение. Контраст между кольцами заметно уменьшен. Верно и обратное: контраст между кольцами, видимыми вне фокуса, увеличивается. Конечно, этот эффект легче увидеть с помощью фильтра, пропускающего только один цвет (например, темно-зеленый или малиново-красный), но для использования такого фильтра требуется очень яркий источник света. Кроме того, край дифракционного диска смягчается внутри фокуса. Загнутый край, как и другие зоны, легче обнаружить на больших дистанциях расфокусировки.

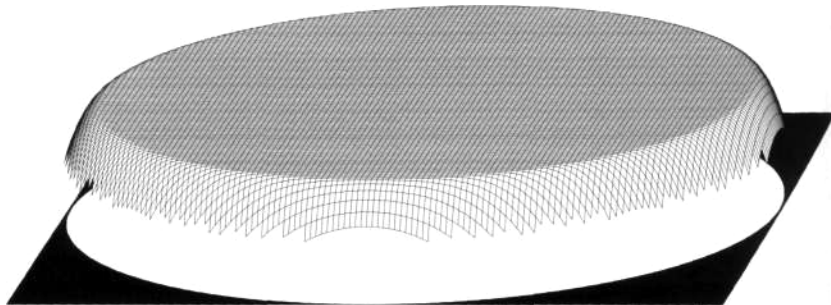


Рис. 11-6. Пример абберационной функции загнутого края.

Загнутый край, начиная с радиуса 95 %.
Общая абберация = 0,63 длины волны.

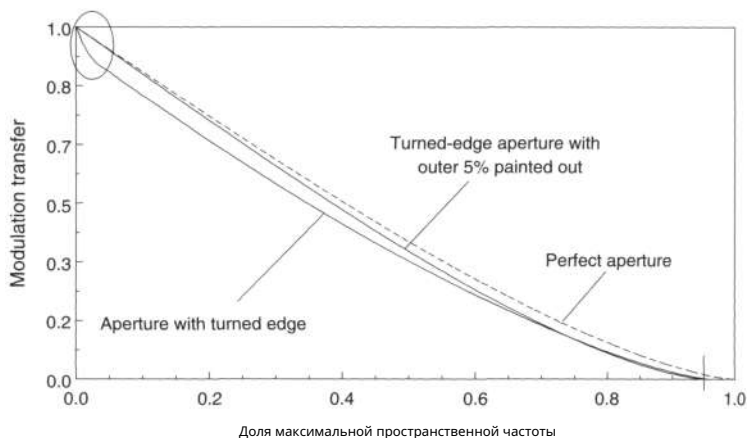


Рис. 11-7. Фильтрация беспрепятственной апертуры, вызванная поворотным краем, который достигает 0,63 длины волны на дальнем крае. Площадь шляпы внутри покрывает 95% диаметра. Коэффициент Штреля немного превышает 0,8, поэтому эта погрешность примерно максимально допустимая. Сравнение проводится с отверстием с замаскированной или закрасненной повернутой частью. MTF стремится к нулю примерно на 0,95 от максимальной пространственной частоты, как и при меньшей апертуре.

На больших расстояниях внутри фокуса туманное свечение загнутого края конденсируется в меньший пучок, и кажется, что край диска испускает свет наружу. Такое поведение показано на рис. 11-9, где дефокусировка показана на 30 длинах волн внутри и вне фокуса.

Другие абберации также делают дифракционные кольца более отчетливыми с одной стороны фокуса, чем с другой (примером является сферическая абберация более низкого порядка), но ни одна из них не демонстрирует однородности освещения диска. Можно задаться вопросом, можно ли обнаружить перевернутый край при наличии сферической абберации или его слишком сложно выделить из запутанного изображения.

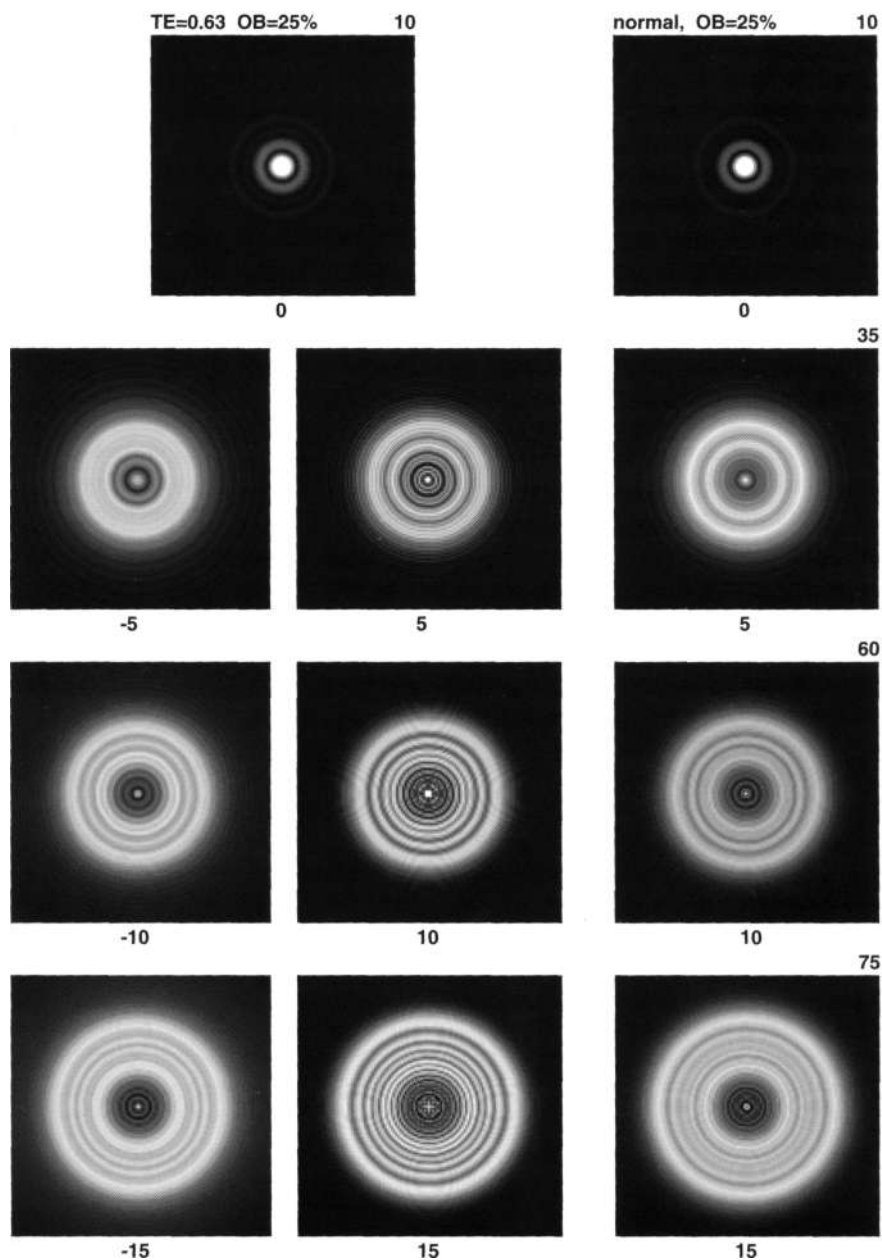


Рис. 11-8. Образцы изображений загнутой кромки, начиная с 95% радиуса и имеющие значение 0,63 длина волны прямо на краю. Препятствие составляет 25 %, а в столбце справа отображаются нормальные необеррированные паттерны.

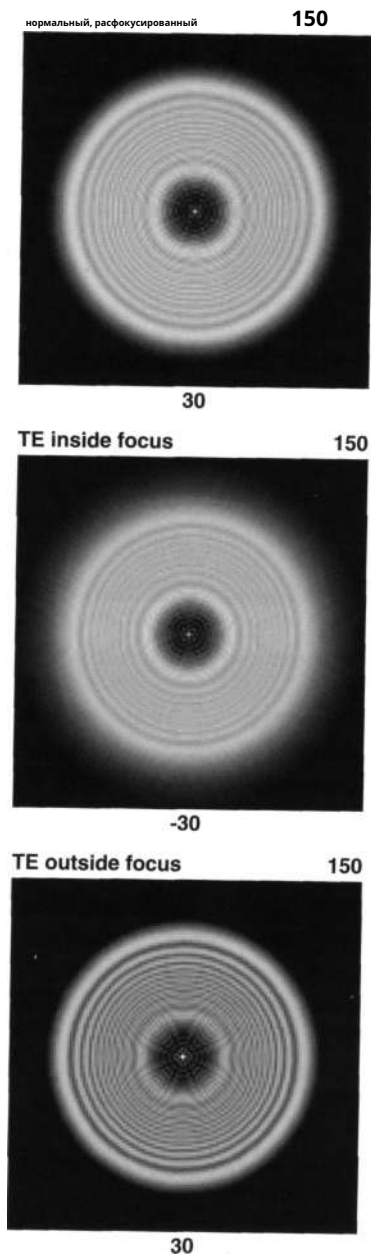


Рис. 11-9. Край не в фокусе на ± 30 длин волн. Также показан нормальный внешний вид. Мальтийские кресты — это эффект муара, вызванный частотой дискретизации рассчитываемого изображения. Они не появятся в реальном представлении.

Если, скажем, $k \ll 4$ длины волны сферической аберрации, перевернутый край будет виден за пределами 20 длин волн дефокусировки (изображение не показано). Сферическую аберрацию становится трудно обнаружить из-за дефокусирующей аберрации на 20 длин волн, но перевернутый край все еще виден. Таким образом, перевернутый фронт действительно может быть обнаружен при наличии незначительной ошибки коррекции.

Когда изображение сфокусировано внутрь на большое расстояние, мягкий край диска с низкой яркостью становится трудно различимым. Низкий контраст в кольцах является более верным индикатором загнутого края, а тонкий вид границы является еще одним свидетельством.

Эллисон и другие последующие авторы отмечали, что край диска внутри фокуса выглядел «волосатым» (Ингаллс, 1976). Было бы неудивительно, если бы неконтролируемый способ применения загнутой кромки к зеркалу привел бы к некоторой структуризации рассеянного света, создавая тем самым «волосатый» край. Однако я никогда не был уверен, что такой эффект создается перевернутой кромкой или вызван обычной турбулентной аберрацией, воздействующей на небольшую сферическую аберрацию низкого порядка.

Учитывая более широкие и менее глубоко загнутые края, характерные для зеркал любительского изготовления, следует ожидать некоторых модификаций этих узоров. Повернутая область направляет свет под меньшими углами и выглядит более компактно. Кроме того, оптимальное расстояние для обнаружения мягкого края находится несколько ближе к фокусу, чем рекомендуемое выше число 20 длин волн.

Рефракторы тоже могут иметь загнутые края, но внешний вид будет обратным. Внутри фокуса находятся контрастные кольца; мягкий край и кольца низкой контрастности находятся снаружи. Однако рефракторы не склонны иметь загнутый край, если только он не широкий. Обычно ячейка линзы скрывает дальний край объектива за стопорными кольцами. В каком-то смысле это преимущество компенсирует невозможность скрыть центральную зону за второстепенной. Немногие рефракторы сделаны настолько плохо, что на них заметны загнутые края.

Сфокусированные изображения на рис. 11-8 демонстрируют практически незначительный эффект загнутого края в приложениях с высоким разрешением. Рассеянное свечение все еще присутствует, но оно невидимо по сравнению с ослепительным звездным изображением. Помимо слегка уменьшенной эффективной апертуры, загнутый край преимущественно нарушает низкие пространственные частоты (или широкие детали).

11.3.4 Отношение сигнал/шум закругленной кромки

Эффект подвгнутой кромки очень похож на грязную оптику тем, что она «рассеивает» свет по всему полю зрения. Поэтому поучительно и показательно провести эквивалентный расчет отношения сигнал/шум. В большинстве ситуаций наблюдения в темном поле загнутый край похож на пыльную оптику или паучью дифракцию, поскольку небольшие количества не имеют большого значения. Крошечная часть уже тусклого объекта

свет ничтожно мал. Однако в случае лунно-планетарной астрономии или попыток наблюдения тусклого объекта рядом с ярким, перевернутый край может стать серьезным источником неприятностей. Сколько можно терпеть?

Для планетарной астрономии важны две вещи: 1) диаметр индуцированного гало перевернутой кромки и 2) количество света, удаляемого из изображения. Диаметр легко оценить. Обращаясь к диаграмме MTF на рис. 11-7, мы видим, что точка середины начального резкого падения (отмечена овалом) происходит примерно на 2% от максимальной пространственной частоты. Это число преобразуется в радиус около $50\lambda/D$, или около 40 радиусов диска Эйри для заточенной кромки на 5%. В апертуре 200 мм при использовании желто-зеленого света радиус свечения составляет около 30 угловых секунд. Для амплитуды перевернутого фронта всего $1/8$ длины волны, количество энергии, удаляемой из изображения (и вновь появляющейся в виде шума), составляет чуть менее 1% от общей энергии. Таким образом, отношение сигнал/шум может достигать 20 дБ.

Что действительно беспокоит в изогнутом крае, так это относительная компактность гало. Он не отбрасывает свет так далеко от изображения, как пыль. Тридцать угловых секунд означают, что большая часть мешающего света *все еще внутри планетарных дисков*. Повернутые края — это пагубная ошибка, которая снижает контраст, намного превышающий его номинальную величину. Амплитуда 5%-ной краевой зоны должна быть уменьшена до $1/25$, прежде чем оно достигнет значения SNR 30 дБ, которое было задано как допуск на пыль. Эта сумма едва ли поддается измерению. Конечно, загнутый край такой малой величины вряд ли ведет себя так же, как загнутый край. Начало конкурировать с внутренними зонами и ошибками шероховатостей.

Лучший способ уменьшить дифракцию на перевернутой кромке — сделать ее чрезвычайно узкой. Тогда гало с перевернутым краем будет казаться намного больше и, соответственно, тусклее. Во-первых, он будет отводить свет за пределы планетарных дисков и преломлять меньше света. Для 2,5% поворота того же самого $1/8$ амплитуды длины волны, как в вышеописанном случае, отношение сигнал/шум 24 дБ дифрагируется до ореола с удвоенным углом. Теперь, поскольку большая часть рассеянного света не попадает в изображение, а площадь перевернутого края меньше, истинное отношение сигнал/шум увеличивается до 28–30 дБ.

11.3.5 Ширина заточенной кромки

Обычно, когда загнутый край менее заметен, чем на рис. 11-8 и 11-9, вам не о чем беспокоиться. Но если у вас возникла серьезная проблема с краевой зоной, радиус, при котором зона начинает вращаться, является полезной информацией. Возможно, вы можете провести дополнительные тесты с масками краев, чтобы попытаться определить радиус поворота и серьезность зоны, но такие проверки сложно интерпретировать.

Радиус поворота легче определить, используя вариацию формулы Фуко.

тест. Попробуйте использовать закрывающий нож вне фокуса звездного теста с искусственным источником, проводимого ночью. Источник должен быть очень ярким, поэтому переместите фонарик поближе к сфере или используйте сферу большего размера. Установите нож на половину пустой трубки того же диаметра, что и окуляр. (Фрагмент игровой карты или непрозрачный листок бумаги работает почти так же хорошо, как настоящий нож, и дает меньше шансов на случайность.) Вы можете выполнить точную настройку, вращая этот «окуляр». Расфокусировка должна быть 5 мм и более. Расположите телескоп так, чтобы тень от ножа закрывала либо $1/4$ или $3/4$ апертуры, но не половина. Не заменяйте это лезвие ножа постановлением Ронки. Боковые изображения решетки мешают интерпретации края.

Если тень на диафрагме лежит идеально ровно и кажется твердой, попробуйте поднести нож ближе к фокусу. Если вы видите размытую, дрожащую тень, которая сбивается при малейшем прикосновении, вероятно, вы слишком близки к фокусировке. Отложите нож подальше. Вам нужен легкий изгиб тени очень близко к краю апертуры. Завиток становится серьезным за пределами радиуса поворота.

Если вы можете таким образом определить ширину загнутого края, то свернутая область, вероятно, слишком широка, чтобы ее можно было раскрашивать, как предложено ниже. То, что вы хотите увидеть, — это мало или вообще никаких свидетельств того, что этот грубый тест изменил ситуацию. Вам нужно покрасить только узкий загнутый край. Если вы обнаружите широкий загнутый край, вам будет легче замаскировать проблемную область. Используйте определенный здесь радиус поворота, чтобы рассчитать размер отверстия, через которое вы хотите обеспечить пропускание света.

11.3.6 Способы устранения загнутого края

Как было показано на диаграмме MTF выше, зеркало с загнутой кромкой работает не лучше, чем меньшая идеальная апертура на высоких пространственных частотах, и хуже, чем меньшая апертура на низких пространственных частотах. Очевидно, что последняя часть апертуры на периферии практически ничего не влияет на качество изображения. Загнутые края собирают бесполезный, несовершенный сфокусированный свет и портят в остальном идеальные изображения.

Маскирование не является необратимым шагом, но требует некоторых механических навыков. Как правило, это включает в себя создание узкого кольцевого пространства и поиск способа удержать его над зеркалом. Держатель маски, установленный над зеркалом, лучше всего подходит для крепления Добсона с открытой трубкой. С таким телескопом легко получить доступ к области чуть выше зеркала, а установка и регулировка краевой маски удобна.

Те владельцы зеркал, у которых есть точный диагноз «повернутый край» и которые готовы принять на себя значительные риски, могут значительно улучшить характеристики зеркала телескопа, покрасив его. Не следует пытаться красить с широкими загнутыми краями. Определение слова «широкий».

зависит от диаметра отверстия. Десять миллиметров звучат широко для зеркала диаметром 150 мм и узкими для зеркала диаметром 500 мм.

Однако покраска зеркала возможна с любым телескопом и требует только твердой руки. Снимите зеркало и поместите его на ленивую съезен или другую вращающуюся платформу. Убедитесь, что зеркало больше, чем вращающийся столик под ним. Уделите некоторое время тщательному центрированию и выравниванию зеркала на оси, чтобы оно не раскачивалось и не вращалось эксцентрично.

Медленно вращая диск, зафиксируйте руку в одном месте и осторожно введите острие кисти на поверхность зеркала, работая от края. Вы никуда не торопитесь, поэтому постарайтесь провести чистую линию в течение многих революций. Я не советую использовать перманентный маркер, но если вы это сделаете, имейте в виду, что растворитель имеет тенденцию стирать существующие следы, поэтому вам, возможно, придется сделать несколько проходов, прежде чем чернила останутся на зеркале. Кисти менее управляемы, но рисование таким способом приводит к более насыщенному затемнению. Не используйте аэрограф или аэрозольную краску любого типа.

Выполните операцию покраски в два этапа. В первый раз закрасьте всего 1-2 мм дальнего края. Если вам повезет, эта узкая лента в значительной степени решит проблемы с краями. Звезда снова проверяет зеркало. Если изображение не улучшится, расширьте окрашенную зону внутрь. В конце такой процедуры некрасивый вид зеркала может шокировать. Однако имейте в виду, что вы, по сути, обрезали самую плохую часть апертуры.

Эффект исправленного перевернутого фронта можно увидеть в звездном тесте. Как это улучшит реальные наблюдения, пока неясно. Помните, что самая неприятная особенность загнутого края — это неясное свечение вблизи изображения яркой точки — на расстоянии от 20 до 40 радиусов Эйри. Проверка диаграммы MTF показывает быстрый провал на низкой пространственной частоте. Для этой зоны шириной 5% большая часть ущерба уже нанесена к моменту достижения 2-5% максимальной пространственной частоты цели MTF. Если апертура составляет 200 мм (8 дюймов), то расстояние между деталями менее 10-30 угловых секунд ухудшается. Маскирование перевернутого края принесет наибольшую пользу при использовании крупных объектов с высокой детализацией, таких как ядра плотных шаровых скоплений или планетарных дисков.

Глава 12

Хроматическая aberrация

Простая линза-рефрактор фокусирует свет на разных расстояниях позади себя, что приводит к ошибкам цвета. Одновременно можно выбрать только один фокус, поэтому остальные цвета выглядят как расфокусированные диски. Кроме того, из-за разных фокусных точек увеличение каждого цвета разное, а края белого света размываются в спектры.

Чтобы понять, в чем заключается сложность, возьмите простую одноэлементную линзу и посмотрите на передаваемое изображение в окуляр малюго увеличения. Такая линза часто встречается в игрушечных телескопах или биноклях. Очевидно, что хроматическая aberrация глубока. Кажется, что каждый яркий объект окружен радужным сиянием, и разумное изображение возникает только для полей, состоящих, что неудивительно, только из одного чистого цвета.

Ранние астрономы уменьшили важность цветовой ошибки простой линзы, увеличив фокусное расстояние до огромных значений. Эта уловка увеличила глубину фокуса, пока не охватила распространение цветов, и они обнаружили, что производительность улучшилась. Однако выиграть битву было трудно, потому что скромное увеличение диафрагмы должно было сопровождаться огромным увеличением фокусного расстояния, а эксплуатационные трудности значительно усугублялись (King 1955; Bell 1922).¹

Даже сегодня остаточная цветная ошибка видна в приборах с номинальной цветовой коррекцией. Сфокусируйте бинокль на ярком крае на более темном фоне (хорошей целью является окно изнутри большой комнаты), а затем децентрируйте изображение. Поскольку коррекция цвета для этих инструментов является лишь приблизительной, вы увидите размытие, связанное с ошибкой цвета. В некоторых биноклях цветные полосы бывают фиолетовыми и зелеными, в зависимости от того, находится ли яркий край внутри или снаружи поля зрения.

¹Многие искатели 5 × 24 на телескопах универмагов на самом деле представляют собой простые линзы с диафрагмой. Если стопа примерно 8 мм видна сразу за объективом, она не корректируется по цвету. Поисквик бесполезен. Отбросьте это.

Цветовые ошибки на самом деле не являются aberrациями в том узком смысле, что aberrации — это отклонения от идеальной сферической формы волнового фронта. Можно легко описать апертуру, которая фокусирует каждый цвет точно в разных осевых точках. В любом цвете волновой фронт сходится сферически. Такую апертуру можно было бы по праву назвать идеальной, но в качестве объектива телескопа она не годилась.

Еще одним важным различием между aberrациями волнового фронта (или «геометрическими») и хроматическими aberrациями является отсутствие интерференционных эффектов при хроматических aberrациях. Разные цвета не мешают друг другу. Для большинства обсуждений, представленных в этой главе, *волновая оптика и лучевая оптика идентичны*.

Какова бы ни была причина оптического ухудшения, ошибка цветопередачи нежелательна, и одна из целей звездного теста — убедиться, что она как можно меньше.

12.1 Дисперсия

Все образцы изображений, представленные в этой книге, были рассчитаны для одной длины волны света, так называемого монохроматического излучения. Идеальная линза фокусировала бы все цвета на одном и том же расстоянии, а линзы были бы неотличимы от зеркал.

К сожалению, все простые линзы являются дисперсионными. Слово *дисперсия* представляет собой неспособность всех цветов света двигаться с одинаковой скоростью в стекле. Как слово *распространение*, его источником является ботаника или сельское хозяйство. «Дисперсия» первоначально относилась к случайному распространению семян. Его оптический смысл относится к распространению цветов, но такое рассеивание не является случайным. Фактически, если бы это еще не было применено к ошибке цвета, *дисперсия* возможно, это было бы лучшим словом для обозначения того, что сегодня известно как «рассеяние света».

Красный свет обычно имеет более высокую скорость в стекле, чем синий свет. Таким образом, волны красного света обгоняют волны синего света, проходя через материал. Конечный эффект заключается в том, что после прохождения через призму синий свет отклоняется на больший угол, чем красный свет.

Допустим, у нас есть два материала призмы, как на рис. 12-1а, которые отклоняют или *преломляют* свет под указанными углами. Среднее поведение двух призм одинаково. Каждый из них излучает желтый свет на 10° , но поведение на обоих концах спектра несколько разное. Одно стекло (назовем его «коронным») отклоняет красный свет под углом 9° , а синий — под углом 11° . Другое стекло (назовем его «кремь») расширяет спектр вдвое дальше, до 8° и 12° соответственно. Говорят, что этот второй образец стекла имеет более высокую дисперсию из-за этого свойства растекания.

Мы можем комбинировать эти призмы для получения интересных эффектов. Если мы инвертируем

кремневою призму и плотно прижав ее к венцу, как на рис. 12-б, мы сделали примерно плоскопараллельное окно. Комбинация пропускает желтый свет без отклонения, но красный смещается до 1° , а синий отклоняется до -1° . Здесь мы представили себе прямооточный дисперсионный элемент, который распределяет свет на его цветовые компоненты, но в среднем не преломляет его. Такое устройство когда-то было изготовлено и продано как объективная призма фирмой Мерца и Малера, но его высокая стоимость помешала широкому распространению (King 1955, стр. 294). Преимущество такой призмы заключалось в том, что телескоп можно было сразу направить на интересующую область.

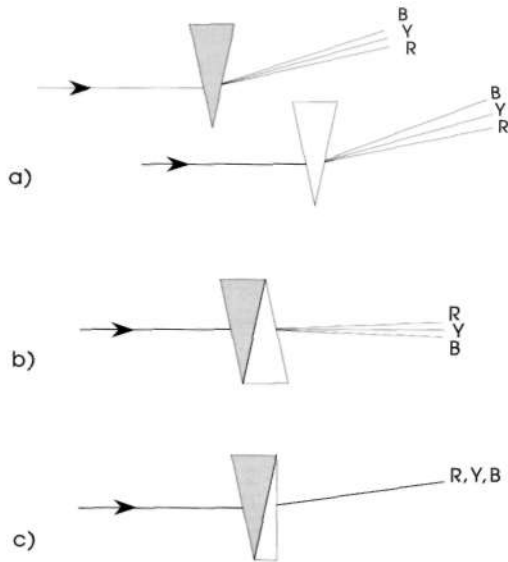


Рис. 12-1. Упрощенный ахроматизм: а) стекло «корона» (темная призма), показывающее дисперсию света, и «кремневое» стекло, демонстрирующее ту же среднюю преломляющую силу, но вдвое большую дисперсию, б) два стекла объединены, чтобы создать «прямоточную радугу» (рассеивание без отклонения), в) сочетание, которое приводит к ахроматической призме (отклонение, но не дисперсия).

На рис. 12-1с показан еще один хитрый трюк, который можно проделать с этими двумя материалами. На этот раз мы делим кремневою призму пополам, создавая еще одну призму, которая отклоняет желтый свет только на 5° . Синий свет выйдет из этой полупризмы под углом 6° , а красный свет — под углом 4° . Если мы перевернем эту призму, как раньше, и поместим ее близко к коронной призме, то выходные углы комбинации станут: желтый, $10^\circ - 5^\circ = 5^\circ$; красный, $9^\circ - 4^\circ = 5^\circ$; и синий, $11^\circ - 6^\circ = 5^\circ$.

Если бы кто-то проектировал хрустальную люстру, такая комбинация призм была бы катастрофой. Вместо того, чтобы делить свет на обилие сверкающего дождя...

Дуги, составная призма удерживает свет плотно в белом луче. Он одинаково отклоняет все цвета. С другой стороны, если проектировать телескопы, то это именно то, что нужно. Это устройство имеет две важные характеристики. Он преломляет свет и делает это бесцветно. Здесь были продемонстрированы все основные элементы ахроматического телескопа-рефрактора.

12.2 Ахроматическая линза

На рис. 12-2 показан прогресс, который должен произойти, чтобы перейти от ахроматической призмы к ахроматической линзе. Если мы представим линзу состоящей из маленьких частей призмы и позволим делениям становиться все тоньше и тоньше, мы в конечном итоге приходим к цилиндрической линзе. Требуется совсем немного воображения, чтобы повернуть в другую сторону и распространить ситуацию на сферическую линзу.

Почти сразу же, как только была разработана концепция дисперсии, возник этот трюк ахроматизма. Осталось найти подходящие материалы. Исаак Ньютон провел ограниченные эксперименты, в которых сравнивал дисперсионную способность различных сред с их преломляющей способностью. Его поспешный вывод заключался в том, что дисперсия и рефракция неразрывно связаны между собой. Таким образом, дисперсию нельзя было уравновесить, не устранив также искривление светового луча. Он пришел к этому ошибочному результату, возможно, слишком сильно полагаясь на интуитивное ощущение, что дисперсия является свойством самого света. Согласно этому аргументу, материалы не имели значения; Дисперсия была пропорциональна преломлению и, таким образом, существовала всегда, пока линзы не были ослаблены и ничем не отличались от окон. Поэтому ахроматические рефракторы были невозможны.

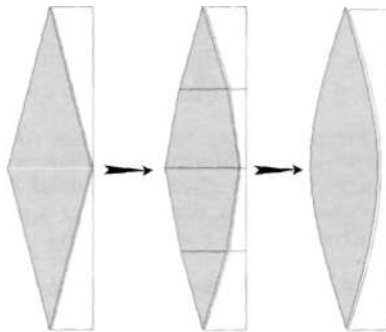


Рис. 12-2. Как ахромат призмы ведет непосредственно к ахроматической линзе.

Были сделаны различные противоречивые заявления об ошибке Ньютона. Белл (1922) сказал, что Ньютон никогда не публиковал этот результат, а Кинг (1955) ссылался на часть работы Ньютона. *Оптика* где великий физик

отчаялся когда-либо вылечить хроматическую aberrацию, но не объяснил причин. Путаницу, возможно, можно уменьшить, сославшись на еще одну часть *Оптика*, где Ньютон сказал (Книга первая, Часть II, Положение III, Проб. I, Опыт 8):

Более того, я обнаружил, что когда Свет выходит из Воздуха через несколько смежных преломляющих сред, например, через воду и стекло, а затем снова выходит в Воздух, независимо от того, параллельны ли преломляющие поверхности или наклонены друг к другу, этот Свет так часто, как Напротив, преломления настолько исправлены, что возникают в линиях, параллельных тем, на которые они упали, и после этого продолжают оставаться белыми. Но если возникающие Лучи будут склонны к этому падению, Белизна возникающего света постепенно, проходя от Места Возникновения, станет окрашенной по краям Цветами. Я попробовал это сделать, преломляя свет стеклянными призмами, помещенными в призматический сосуд с водой.

Другими словами, условий, приводящих к прямому спектру, показанному на рис. 12-1b, не возникает, а это означает, что рис. 12-1c также невозможен. Вслед за этим экспериментом он выдвинул несколько умозрительных теорем, развивающих его идеи. В защиту Ньютона я не считаю, что дискредитация идеи ахроматизма была главной целью в этом разделе работ. *Оптика*, но этот эксперимент был среди тех, которые более поздние читатели интерпретировали как более сильное осуждение, чем оно было на самом деле.

Отчасти из-за влиятельной репутации Ньютона оптики отказались от ахроматических линз на 50 лет. Затем английский джентльмен по имени Честер Мур Холл изготовил первую линзу уменьшенного цвета из двух разных материалов. Он скрывал конструкцию линзы, хотя этот трюк был перепроектирован любопытным производителем линз, который, как оказалось, был нанят субподрядчиком для работы над обеими линзами одновременно. Производитель линз не осознавал важности изобретения, и новости о нем томились до тех пор, пока поколение спустя оно не было переработано Джоном Доллондом. Когда выяснилось, что это прибыльная разработка, лондонские оптики подали иски, утверждая, что Доллонд украл эту идею.

Доллонд, вероятно, слышал слухи об линзе Холла, но, конечно, он сам провел достаточно экспериментов, чтобы ему по праву приписали изобретение ее заново. Возможно, правильнее было бы сказать, что Доллонд был первым, кто превратил ахроматические линзы в обычную практику. Он, конечно, был первым, кто объявил об этом публично (King 1955, стр. 144-150).

12.3 Остаточная хроматическая aberrация

К сожалению, идеальных материалов, показанных на рис. 12-1, не существует. Большая часть дисперсии в диапазоне видимых длин волн возникает из-за резонансов в ультрафиолете. В полосах частот этих резонансов чудесно прозрачные материалы становятся непрозрачными. Прозрачный характер этих материалов (называемых *диэлектрики*) в видимом спектре сохраняется не для каждой длины волны. В большей части спектра материалы принимают энергию на входе и излучают ее на выходе с очень небольшими потерями. Энергия касается молекул, мало их беспокоя. Однако на определенных частотах эти материалы необычно возбуждаются падающей энергией. На длинах волн, близких к резонансу (обычно около 100 нм), молекулы стекла внезапно поглощают энергию и преобразуют ее в тепло, а не передают ее дальше.

Материал ведет себя как детские качели. Если качать качели каждые четверть часа, маятниковое движение не возникает. Если качели совершаются три раза в секунду, большинство толчков не рассчитаны по времени, и снова маятниковое движение не возникает. Если импульсы тщательно рассчитаны, энергия, теряемая качелями (или стеклом), неуклонно увеличивается. Качели приводятся в движение на резонансной частоте. Энергия, содержащаяся в световой волне, больше не проходит сквозь стекло, поскольку она должна вызывать колебания материала. Прозрачность разрушена (Hecht 1987, стр. 63).

Наличие резонансов в ультрафиолете приводит к резкому увеличению показателя преломления оптических материалов в видимом спектре к синему концу спектра. Большинство стекол также имеют дальний резонанс в инфракрасном диапазоне, вызванный молекулярной вибрацией, но этот резонанс менее сильно влияет на наклоны в видимом диапазоне.

Одна из целей разработчика линз состоит в том, чтобы выбрать силу линз таким образом, чтобы дисперсия «коронавидных» элементов линзы компенсировала противоположную дисперсию «кремневых» линз. Поскольку дисперсия резко наклоняется к фиолетовому концу спектра, а количество приемлемых материалов ограничено, цветокоррекция не может быть идеальной. Разработчики объективов не могут подобрать светосилу для каждого цвета так, чтобы дисперсия складывалась как ложки. Если они комбинируют два материала линз, разница в преломлении синего цвета означает, что они, вероятно, смогут выбрать только два цвета с одинаковыми фокусными точками. Остальная часть спектра должна пойти туда, куда она пожелает. Каждый цвет, естественно, будет сочетаться с другим цветом с противоположной стороны спектра, но дизайнер может сознательно выбрать только два.

Для большинства зрительных телескопов дизайнер пытается объединить два цвета: красный (линия Фраунгофера C при длине волны 656 нм) и сине-зеленый (линия Фраунгофера F при длине волны 486 нм). Фокус желтого цвета

находится немного ближе к объективу, а дальние края спектра (темно-красный и фиолетовый) находятся за пределами фокуса CF. Вайолет находится дальше всех, но это не имеет значения. Человеческий глаз не чувствителен к фиолетовому цвету, за исключением случаев высокой яркости, поэтому расфокусированный ореол фиолетового света практически невидим. Остаточный цветовой разброс ахроматических объективов между двумя выбранными цветами известен как *вторичный спектр*.

Цветокоррекция не зависит от размера. По мере увеличения диаметра объектива его необходимо изготавливать с более высоким фокусным отношением, чтобы сжать свет между C и F внутри диска Эйри. В то время как небольшие 80-мм объективы по-прежнему могут превосходно работать при диафрагме $f/10$, обычный ахромат диаметром шесть дюймов должен быть изготовлен с диафрагмой $f/18,5$, чтобы также фокусировать различные цвета (Sidgwick 1955, стр. 67; Rutten and van Venrooij 1988, стр. 55). А. Е. Конради еще более консервативен, заявляя, что фокусное расстояние для 80-мм объектива должно быть $f/15$, а для 6-дюймового — $f/29$ (1957, I с. 201). Поскольку вторичный спектр $1/2000$ г. для обычных ахроматов мы можем использовать Приложение E, чтобы показать:

$$\Phi'' = \frac{D[\text{мм}]}{8,8\Delta n} \quad (12.1)$$

где Δn — это количество ошибок дефокусировки длин волн, которые мы готовы допустить во вторичном спектре, D — диаметр отверстия, а Φ это фокусное соотношение. После обсуждения глубины резкости в главе 5 мы помещаем Δn в $1/2$ длины волны. Формула принимает вид $0,23 \cdot D[\text{мм}] = \Phi$, или $f/18$ для диафрагмы 80 мм и $f/35$ для 6-дюймовой диафрагмы. Этот результат столь же консервативен, как и результат Конради. Тем не менее, я наблюдал через 6-дюймовый рефрактор $f/15$, и меня лишь умеренно беспокоил избыток цвета. Возможно, ограничение можно ослабить до одной длины волны без особых потерь. В этом случае оно падает до $0,12 D[\text{мм}] = \Phi$, что то же самое, что и Сиджвик.

Эта дискуссия о фокусном отношении звучит тревожно по поводу так называемого совершенства обычных рефракторов. Возможно, это также что-то говорит о терпимости человека к хроматическим ошибкам.

Разработчики объективов нашли и другие полезные возможности телескопической цветокоррекции, помимо объединения CF в общий фокус. На заре астрофотографии в ахроматах специального назначения корректировались ортохроматические эмульсии, которые тогда широко использовались. Ортохроматические пластинки были наиболее чувствительны к синему свету в ближнем ультрафиолетовом диапазоне и совершенно нечувствительны к красному. Фототелескопы можно было сфокусировать только с помощью утомительного процесса съемки реальных экспозиций, но они давали более резкие изображения на пластинке, чем объектив с визуальной коррекцией.

Поскольку конструктору приходилось учитывать всю оптическую систему, в конструкции были учтены личные предпочтения наблюдателя. Кривые цветокоррекции, опубликованные Беллом (стр. 91), показали, что лучшие мастера XIX века предпочитали сфокусировать линию F (сине-зеленую).

с темно-красным цветом при 680 нм (линия В). Большая часть этого сдвига цветокоррекции, предположительно, вызвана хроматической аберрацией, присущей глазу и окулярам, использовавшимся в то время (Taylor 1983).

12.4 Апохромат

Ахроматизм можно сравнить с завязыванием спектра в узел. Самые яркие части зрительного спектра намеренно сложены в самый тугой пучок, причем темно-красный и фиолетовый концы свисают, как шнурки. Некоторые из первых оптических специалистов (особенно Питер Доллонд, сын разработчика ахроматических линз) пытались разобраться в причине этих спектральных дефектов. Доллонд мог выбирать лишь из нескольких очков. Он рассуждал, что если кремневый элемент «спроектирован» из композиции двух стекол, то дисперсию этого элемента можно будет настроить так, чтобы он более тесно совпадал с противоположной дисперсией элемента короны.

Он изготовил и продал такой тройной объектив, но, судя по всему, объектив был разработан методом проб и ошибок. В любом случае, очки того времени еще не были достаточно хороши, чтобы обеспечить такую тонченность. Лишь в 1892 году Х. Деннис Тейлор создал апохроматическую линзу, используя комплексную оптическую теорию. Он не только более полно скорректировал вторичный спектр, но и сложил фиолетовый хвост спектра достаточно близко к визуальному, чтобы позволить фотопластинкам того времени, чувствительным к синему свету, использовать тот же фокус, что и человеческий глаз (King 1955).

Использование трех разных форм стекла (или двух, если используются экзотические очки) позволяет разработчику объектива внести дополнительный излом в дисперсионные кривые, что, в свою очередь, позволяет одновременно фокусировать три выбранных цвета. Цветовое распространение снова завязывается. Часто цвета, выбранные для общего фокуса, разделены дальше, чем линии Fraunhofer C и F. Одна из таких коррекций приводит линии C, e и g в общий фокус, то есть красный, желто-зеленый и фиолетовый (Kingslake 1978, стр. 86). Глубоко-фиолетовый и темно-красный края спектра расположены ближе к зрительному фокусу. Обычно остаточный третичный спектр сокращается в пять раз до $1/10000$ ж(Руттен и ван Венрой, 1988, с. 54).

Однако правильное поведение ярких участков спектра не является гарантией того, что спектральные хвосты будут близки к фокусу. Многое зависит от того, что задумал дизайнер. Некоторые апохроматические рефракторы могут быть предназначены исключительно для визуального использования, сводя к минимуму разброс фокуса между C и F. Эти апохроматы могут приближать фиолетовый цвет лишь немного ближе, чем обычные дублеты. Другие могут быть предназначены для точного фотографического изображения без использования фильтров, фокусируясь на глубоком фиолетовом цвете с лишь незначительно улучшенной визуальной коррекцией.

12.5 Проверка рефракторов на наличие геометрических аберраций

Поскольку каждый цвет, по сути, проходит через стекло разной видимой толщины, можно было бы ожидать, что поправка на другие аберрации может варьироваться в зависимости от спектра. Фактически, некоторые аберрации вообще не исправляются. Многое зависит от того, сколько свободных параметров разрешено экспериментировать разработчику объектива.

Например, переменными дублета являются все четыре кривые, расстояние между линзами, положение диафрагмы и рецептура стекла (которых существуют сотни важных типов). Если дизайнерам разрешено изменять эти параметры по своему желанию, они смогут сфокусировать два выбранных цвета одновременно и адекватно корректировать кому и сферические аберрации в большей части спектра. Однако, если дизайнеры намеренно ограничены в стоимости или других соображениях, они могут сделать цементированный ахромат из неподходящих стекол. Такие условия могут быть настолько ограничивающими, что дизайнер не может одновременно исправить сферическую аберрацию и кому, хотя это возможно при тщательном выборе очков (Kingslake 1978, стр. 171). Большинство производителей качественных астрономических рефракторов не имеют таких ограничений, но самые дешевые потребительские рефракторы вполне могут обеспечивать ограниченную коррекцию аберраций.

Апохромат фокусирует три выбранных цвета в одной точке (более точное определение см. Buchdahl 1970). В трехэлементных апохроматах остается достаточно свободных параметров, чтобы конструкторы могли сделать великолепно корректируемую линзу, минимизирующую хроматическую вариацию сферической аберрации (сферохроматизм) более чем на одной длине волны и подавляющую кому. Кроме того, апохроматы можно адекватно корректировать при более высоких фокусных расстояниях. Шестидюймовые апохроматы обычно изготавливаются с диафрагмой $f/9$. Апохромат должен давать настолько хорошее изображение, насколько позволяет дифракция, и, соответственно, должен быть тщательно проверен.

Вам следует проверить наличие геометрических аберраций в рефракторах, используя фильтр окуляра. Фактически, использование такого фильтра для подавления полихроматичности белого света рекомендуется даже при проверке оптики рефлектора. Рекомендуется использовать очень насыщенный желтый или зеленый фильтр. После того, как вы протестировали центральный цвет, вы можете сменить фильтры на красный или синий, чтобы убедиться, что другие аберрации на краях визуального спектра малы. За исключением ограничения цветовой полосы, проверка рефракторов на наличие других аберраций аналогична проверке рефлекторов.

12.6 Звездный тест на хроматическую аберрацию

Разные цвета не мешают друг другу. Следовательно, хроматическая аберрация не проявляется и в модификациях дифракционных колец.

сосредоточены или расфокусированы. Хроматическая aberrация проявляется в разном положении фокуса для каждого цвета. Смещение может быть боковым, как у мягкой призмы, или продольным. У всех настоящих объективов каждый цвет имеет немного разное фокусное расстояние.

Чтобы увидеть цветовые эффекты, снимите все фильтры и сфокусируйтесь на белой звезде или искусственном источнике. Обязательно отфильтруйте фонарик для ночного теста хроматической aberrации с искусственным источником (см. главу 5).

12.6.1 Клины, ошибки сборки и атмосферные спектры

Обратите внимание на размытие сфокусированного изображения в короткий боковой спектр, эффект децентрации или клина в оптических компонентах. Любая из этих проблем приводит к образованию красной полосы с одной стороны изображения и синей кромки с другой, хотя желтоватый свет внешних планет часто смешивается с этим светом, делая его зеленым. Децентрация может также вызвать другие aberrации, в зависимости от деталей.

Децентрация – это смещение элементов вбок относительно друг друга. Клины — это чрезвычайно мелкая призма, добавляемая к оптической системе. Это происходит из-за того, что элемент толще с одной стороны, чем с другой. После многих лет беспроблемной эксплуатации клины могут появиться внезапно после разборки объектива для чистки. Производители иногда ловко удаляют последний кусочек клина в своих объективах, устраняя его между элементами объектива. Таким образом, если корончатый элемент имеет клины 0,04 мм, а кремневый элемент имеет клины 0,03 мм с максимальным допуском 0,02 мм, общий клины можно уменьшить до 0,01 мм, поместив толстую часть коронки рядом с тонкой частью кремня. Ничего не подозревающий владелец может повернуть эти элементы, чтобы получить общий клины 0,07 мм, что более чем в 3 раза превышает допуск. При сборке элементов объектива обратите внимание на метки совмещения в виде стрелок или царапин на краях дисков.

Еще один несчастный случай может произойти, когда линзы рефрактора разбираются для чистки. Рефракторы настолько долговечны, что даже при хорошем уходе инструменты со временем приобретают слишком много внутренней грязи. Иногда владельцы неправильно переворачивают заводной элемент во время чистки. Эта ошибка иногда случается даже с огромными обсерваторскими инструментами, как это описано в книге Лесли Пельтье. *Звездные ночи* (1965). Он приобрел 12-дюймовый рефрактор Кларка, который излучал отвратительное фиолетовое свечение вокруг изображений звезд. Сомневаясь, что Кларки намеренно выпускает такой плохой инструмент, поскольку это повредит их репутации в профессиональных кругах, Пельтье предположил, что в прошлом элемент заводной головки случайно переворачивался во время стирки. Он снова перевернул элемент и восстановил прекрасные характеристики оригинальной конструкции объектива. Любой инструмент, находящийся на воздушном пространстве, может пострадать от этого унижения, независимо от его размера. Однажды я видел это в хорошем 2-дюймовом рефракторе, но в

В случае этого миниатюрного дублета инверсия также повредила сферическую поправку.

Обычно направление спектральной дисперсии вертикальное. В данном случае виновата атмосфера, а не телескоп. Тот же спектр появился бы в отражателе аналогичного размера, и, конечно, в отражателе не существует механизма, вызывающего такую же дисперсию. Наличие вертикального спектра могло быть вызвано либо лужами холодного воздуха в нижней части телескопа, либо (что более вероятно) небольшим призматическим эффектом в самой атмосфере.

Наблюдатели часто становятся свидетелями изменения цвета низколежащих планет и ярких звезд. Любой объект, расположенный ниже 45° , скорее всего, будет слегка размазан. Такие ошибки маловероятны для искусственных источников, но на небе они слишком распространены. Вращение трубки поможет изолировать эту ошибку от воздействия воздуха. Выберите звезду ближе к зениту.

12.6.2 Звездный тест для обычных астрономических визуальных дублетов

Конструкция коронно-кремневой линзы-рефрактора застыла в XIX веке. Отдельные производители выбрали несколько разные кривые остаточной дисперсии, но все они были более или менее ограничены доступностью материалов. Качество и однородность материалов улучшились, но самые простые астрономические рефракторы по-прежнему изготавливаются по конструкциям, которые были признаны производителями 1800-х годов.

Следующий звездный тест не применим к современным усовершенствованным рефракторам, изготовленным из необычных материалов. Он основан на звездном тесте, проведенном автором на 4-дюймовом рефракторе Алвана Кларка с диафрагмой $f/15$, построенном в 1881 году. В этом тесте в качестве мишени использовалась Полярная звезда. По сути, это то же описание, которое было найдено у Тейлора (в 1891 году), который, вероятно, использовал аналогичные инструменты и применимо к обычным дублетам даже сегодня.

Внутри фокуса виден очень бледный желто-зеленый диск со следами пурпурной каймы. Сразу за пределами фокуса в центре появляется несколько удивительное красное пятно. Эта чудесно крошечная малиновая точка света удивляет того, кто никогда раньше ее не замечал. Тейлор говорит, что его происхождение находится в темно-красном цвете за линией C.

Появлению этой красной точки способствует дополнительный фактор. Оно примерно совпадает с местом, для которого желто-зеленый цвет находится вне фокуса на 1 длину волны. Картина дифракции желто-зеленого света для этой ситуации выглядит как на рис. 12-3а, на котором показано кольцевое пространство с аккуратно пробитым в нем отверстием. уравнение 5.1 дает сдвиг фокуса до дефокусировки $+1$ длины волны как $8F^2\lambda$. Часть фокусного расстояния составляет всего лишь $8F^2\lambda/\phi$. Для 4-дюймового рефрактора $f/15$ в желто-зеленом свете это отношение составляет $8(225)(2,2 \times 10^{-5})/60 = 0,00066$.

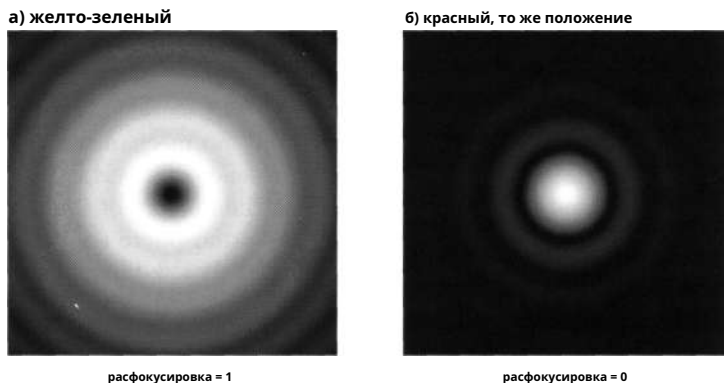


Рис. 12-3. Эффект «красной точки» сразу за фокусом в обычных дублетных рефракторах.

Для обычных дублетных рефракторов разница между желто-зеленым и С (красным) фокусом составляет 0,0005 фокусного расстояния. В том же месте, что и желто-зеленый фокус на рис. 12-3а, красный свет немного за пределами линии С Фраунгофера фокусируется на схеме рис. 12-3б. Таким образом, в яркой желто-зеленой дифракционной картине присутствует удобное маленькое отверстие, сквозь которое проглядывает красный фокус.

За красным пятном бледно-зеленоватый диск снова расширяется. Тейлор говорит, что иногда на этом диске появляется зеленая кайма, но у Кларка она не появлялась или была очень слабой. Дальше в центре должен образоваться неопределенный синий фокус. Однако фокус – слишком сильное слово. На 4-дюймовом изображении был виден сине-фиолетовый размытый шар, который никогда не конденсировался достаточно хорошо, чтобы сформировать то, что можно было бы назвать фокусом.

Наблюдения Тейлора были сделаны с помощью окуляра Гюйгена, тогда как современные изображения были снабжены модифицированным ортоскопическим окуляром. Эта разница, вероятно, объясняет некоторые изменения, а также различия в оптической конструкции. Кроме того, Clark не имел покрытия и имел остаточную окраску очков на момент изготовления, что немного влияло на сравнение с современными дублетами.

Тусклое сфокусированное изображение в основном бесцветно. Его самая неприятная особенность — водянистое фиолетовое или фиолетовое свечение, образующееся вокруг ярких объектов, таких как планета Венера. Лучшее всего Тейлор выразил это, когда описал изображение планеты как черно-белый набросок, где художник сделал последний штрих, нанося губкой дальние красные и фиолетовые цвета. Однако не следует преувеличивать вредные последствия этого ореола. Он привлекает внимание только на самых ярких объектах, и даже тогда он, кажется, лишь незначительно мешает различать детали. На обычных рефракторах диаметром менее 80 мм это фиолетовое свечение практически незаметно. Оно начинает становиться навязчивым в 4 года.

и 5 дюймов (от 100 до 130 миллиметров), но только для крупных инструментов это становится нежелательным. Я видел его в 6-дюймовый рефрактор $f/15$, который использовался в качестве направляющего телескопа для 16-дюймовой камеры Шотланда Шмидта (King 1955, стр. 370). Сатурн имел четкий бело-желтый диск, окруженный ярко-фиолетовым пятном.

Плохо сделанные современные дублеты демонстрируют поведение, не соответствующее обычной цветокоррекции CF. Сильный ореол красного или зеленовато-синего цвета, окружающий сфокусированное изображение, безусловно, является поводом для беспокойства. Такое поведение не является нормальным.

Меньшие количества хроматических аберраций также можно обнаружить, исследуя края изображения непосредственно внутри фокуса. Длина волны, которая фокусируется ближе всего к линзе в нормальном дублете, составляет около 550 или 560 нм (желто-зеленый). Если место, где ахромат сворачивает спектр, находится слишком близко к красному концу, полоса внутри фокуса будет синей с, возможно, небольшой зеленой составляющей. Если складка находится слишком близко к синему концу, бахрома становится алой, а не пурпурной (Sidgwick 1955).

12.6.3 Звездный тест апохроматов или усовершенствованных рефракторов

У апохроматов окраска гораздо менее заметна. Тейлор утверждал, что расфокусированные звездные диски в его фотовизуальных линзах практически бесцветны. Я никогда не проверял фотовизуальные линзы Сооке, поэтому не могу предоставить подтверждения. По мнению Сиджвика (1955, с. 201), сфокусированная фотовизуальная линза имеет ослепительный желто-зеленый диск с пурпурно-красной бахромой. Следует отметить, что слабая красная полоса появляется на точечных источниках даже в рефлекторах, хотя ее трудно наблюдать. Диаметр дифракционного диска увеличивается с увеличением длины волны, и телескоп не может упаковать красный свет в небольшой пучок.

Мой апохроматический рефрактор имеет небольшую пурпурную полосу на небольшом расстоянии внутри фокуса и зеленую полосу в том же положении вне фокуса. В фокусе цвет не виден. Это описание соответствует желтому или зеленому фокусу, ближайшему к объективу, и красному или синему фокусу, расположенному немного дальше. Нигде не образуется размытый сине-фиолетовый фокус. Предположительно, фиолетовый отогнут рядом с фокусом других цветов. Поскольку фиолетовый не яркий, его уже невозможно увидеть в «шуме» других ярких цветов. Расположение красного фокуса не настолько далеко от желто-зеленого, чтобы его можно было отчетливо заметить.

Белый цвет сфокусированного изображения звезды или приглушение цвета на изображениях планеты Венера (по сравнению с обычным дублетом) должны быть мощным индикатором того, что апохромат или усовершенствованный рефрактор правильно откорректирован по цвету. В любом современном триплете или флюорит-дуплете следует терпеть небольшие ложные цвета. На изображениях планет не должны быть легко различимые размытые цвета.

12.6.4 Хроматические эффекты в глазах

Убедитесь, что вы не обвиняете объектив в ошибках цвета в собственном глазу.

Большинство людей не осознают, что их глаза не ахроматические. Фактически, ошибочное предположение о том, что человеческий глаз ахроматичен, заставило более поздних ученых усомниться в исследованиях Ньютона по дисперсии. При нормальном дневном зрении система глазного мозга способна обрабатывать большую часть возникающих цветовых ошибок. Однако астрономия не является обычным занятием, и во время наблюдения обработка данных нарушается. Тейлор упоминает, как кажущаяся цветовая коррекция телескопа нарушилась из-за изменения увеличения и выходного зрачка.

Решением этой проблемы является использование глаза с уменьшенным размером зрачка. По мере увеличения увеличения телескопа он освещает меньшую часть зрачка глаза. Цветокоррекция глаза улучшается при уменьшении размера зрачка по той же причине, по которой рефракторы работают лучше при высоком фокусном отношении. Большая часть воспринимаемой хроматической аберрации возникает в телескопе, а не в глазу. Звездный тест с короткофокусным окуляром.

12.6.5 Окуляра

Объектив может давать вполне приемлемое изображение, которое разрушается несовершенным ахроматизмом окуляра. Возможно, кто-то несправедливо обвиняет объектив телескопа в ошибке, которая происходит позже в оптическом ряду.

К счастью, современный окуляр общего назначения сконструирован так, что работает достаточно хорошо даже с крутым световым конусом $f/4$. Большинство рефракторов, которые мы хотели бы протестировать, работают при диафрагме $f/9$ и выше. При таких умеренных фокусных расстояниях сложные окуляры, такие как ортоскопы или плесслы, работают превосходно. Если они не изготовлены или собраны неправильно, они добавляют к изображению значительную хроматическую аберрацию. Тем не менее, лучше всего они действуют, когда звезда находится в центре поля. Не делайте выводов о хроматических аберрациях децентрированных звезд.

Самый простой способ проверить окуляр — заменить его на другой и посмотреть, исчезнет ли ошибка цветопередачи. Кроме того, поместите подозрительный окуляр в телескоп-рефлектор и посмотрите, сохраняется ли проблема с цветопередачей.

12.7 Выводы и средства правовой защиты

Практически единственные оптические проблемы, обсуждаемые в этой главе, которые можно решить, — это проблемы, связанные с атмосферными эффектами или неправильной сборкой линзы. Большинство других ошибок цвета необходимо устранять на заводе. Вы должны быть очень осторожны, обвиняя инструмент в воспринимаемой хроматической аберрации. Лично я ни разу не видел качественного рефрактора

с грубо неправильной коррекцией хроматических aberrаций. Я слышал о нескольких случаях из вторых рук. Кажется, что даже модели универмагов корректируют цвет правильно, хотя в них испорчены почти все механические функции инструмента. Я видел светосильные рефракторы с богатейшим полем зрения или большие бинокли с лишь незначительной цветовой коррекцией, но специальные рефракторы следует оценивать по другим стандартам, чем лунно-планетарные модели. Владельцы этих телескопов должны понимать, что они обменяли повышенную цветовую ошибку на более широкое поле зрения.

Тестирование с плохим окуляром представляет собой наибольшую вероятность ошибки. Убедитесь, что предполагаемая хроматическая aberrация проявляется во многих окулярах, желательно разных типах. Не проводите испытания с окулярами Гюйгена или Рамсдена, которые часто входят в комплект телескопа. Если используется лампа Барлоу, убедитесь, что она ахроматическая. Известно, что из-за высоких фокусных чисел большинства рефракторов некоторые компании включают в себя линзы Барлоу с простой линзой. Такой объектив можно использовать, но он генерирует неверную цветокоррекцию в звездном тесте. Выполняйте тест при большом увеличении, чтобы избежать проблем с цветом глаз, и будьте абсолютно уверены, что необычная окраска источника света не искажает результаты. Наконец, протестируйте несколько раз, прежде чем будет дана окончательная оценка.

Глава 13

Шероховатость

В этой главе обсуждаются эффекты дифракции, вызванные квазислучайными или асимметричными ошибками полировки поверхности стекла. На сфокусированных изображениях круглые кольца распадаются на крошечные точки, а расфокусированный диск показывает некруглые детали. Читатель должен вынести из этой главы четыре важных момента:

1. Шероховатость волнового фронта обычно представляет собой непрерывный спектр во все более мелких масштабах, которые производители телескопов условно делят на такие категории, как «собачье печенье» или «микрорябь». Однако такие различия представляют собой скорее вопросы номенклатуры, чем описания реальных явлений.
2. Ошибки шероховатости среднего масштаба (первичная рябь или «собачья печенька») — это те ошибки, которые наиболее серьезно повреждают изображение, поскольку они не отклоняют свет далеко от ядра изображения. Рассеянный свет, следовательно, более конденсирован и ярче.
3. Ошибки шероховатости трудно отличить от турбулентности, поэтому необходимо тщательное звездное тестирование, чтобы избежать несправедливой оценки инструмента. Допуск на ошибки шероховатости следует рассматривать в контексте возможных ошибок турбулентности.
4. Шероховатость в масштабе микроряби интересует только производителей специализированных инструментов, которые уже свели другие формы дифрагированного света к точке схода. Микропульсация небольшой амплитуды мало применима к приборам общего назначения.

13.1 Шкалы и эффекты шероховатости

Жесткие методы полировки и использование быстродействующих полировальных составов могут привести к случайным или непериодическим ошибкам, не являющимся круговыми. Эта так называемая «шероховатость поверхности» обычно не рассматривается как проблема глобального масштаба, как воспринимаются ошибки расчета, но она по-своему может нанести вред изображению.

Мы должны тщательно определить, что подразумевается под масштабом поверхности, прежде чем вводить деформации этой поверхности. Представьте, что апертура расширена до размеров Соединенных Штатов. Сферическая кривизна Земли аналогична фокусирующей кривизне волнового фронта. На графиках функции абберации эта кривизна была удалена как неинструктивная универсальная константа. Карта в среднем сплюснена.

Ошибки расчета представляют собой масштабные деформации. Примером может служить сферическая гиперкоррекция, которая начинается практически ровно в центре апертуры и достигает пика в зоне 70%. Затем функция абберации быстро падает, пока не достигнет края. Точно так же центр США начинается довольно ровно в равнинных штатах, поднимается к хребтам Аппалачей или Скалистых гор, а затем быстро опускается к океанам.

Ни один серьезный картограф не предположил бы, что топографию США можно полностью представить с помощью простой модели двух хребтов с плоской областью между ними. Тем не менее, мы можем с пользой описать самые грубые особенности ландшафта с помощью таких общих понятий, как *континентальный водораздел* оставьте более узкие детали на потом. Описывать ошибки изображения оптической поверхности как «сферическую абберацию» или «зональные дефекты» — это своего рода масштабный ориентир. Здесь «масштаб» относится не к тому, насколько высока абберация, а к тому, насколько велика абберация. *широкий* это так, или, скорее, насколько устойчива абберация на больших расстояниях.

Чтобы улучшить карту, ландшафт уточняют, добавляя реки или водоразделы. Многие из этих особенностей распространяются на территории размером с целый штат. На зеркале мы можем решить измерить шероховатость с помощью линейки с делением около $1/10$ или $1/20$ пф апертуры. Это «средние» погрешности шероховатости. Мы также могли бы нанести на карту отдельные горы или изменения рельефа размером с округ и выложить аналогичные «мелкомасштабные» ошибки неровности. При достаточном увеличении на карте можно было обозначить положение валунов, вспаханных полей и канав. аналогично, если мы рассмотрим оптику в молекулярном масштабе, мы увидим извилистую поверхность, но такие ошибки настолько меньше длины волны визуального света, что их невозможно обнаружить обычными средствами. Волновой фронт остается плоским после встречи с шероховатостями размером с молекулу.

Ошибки шероховатости среднего масштаба имеют красочное название «собачье печенье» и менее красочное название «первичная рябь». Их наибольшая ширина примерно соответствует промежуткам между канавками полировального инструмента. Эти каналы всегда вырезаются или отливаются в полировальной машине, чтобы обеспечить пространство.

чтобы смола распространялась под давлением и обеспечивала запасы мелкодисперсного полирующего абразива. Канавки – необходимое зло. Если их не врезать в притир, возникают крупномасштабные ошибки формы, которые даже хуже, чем умеренная степень шероховатости.

Небольшие погрешности шероховатости, называемые «микрорябь», имеют расстояние от 1 до 2 мм. Причина этих ошибок менее очевидна, чем первичная пульсация, но их происхождение, вероятно, кроется в выборе и использовании полировальных материалов. Полирующая паста на основе оксида церия дает более грубые результаты, чем румяна. Восковые притиры дают более волнистую поверхность, чем чистый смола, а бумажные притиры хуже, чем воск. Однако на базовом уровне неровности самого стекла, похоже, ограничивают гладкость. Тексеро утверждает, что притирка способна воздействовать на поверхность зеркала посредством сочетания физических и химических средств, и что, однажды начавшись, такие ошибки являются самоподдерживающимися (Твупан 1988, стр. 578-584; Texereau 1984, стр. 88). -91).

Некоторые быстродействующие притиры обеспечивают шероховатость с характерными размерами, промежуточными по масштабу между классической первичной рябью и микроволнами, которые описательно называют поверхностями «лимонной корки». Однако такое явление редко встречается у инструментов, предназначенных для астрономических целей. Обычно телескопы полируют на более мягких материалах.

Мы могли бы ожидать, что дифракционное изображение от граней шероховатости, характерных для первичной ряби, будет в 5–20 раз больше, чем неаберрированное изображение, но эта упрощенная логика не учитывает случайные корреляции, которые возникают, когда соседние грани рассеяния действуют в фазе друг с другом. . Будут формироваться антиузловые светлые области и узловые темные области. Конечным эффектом мягкой первичной ряби является превращение рассеянного света в узловое свечение, окружающее изображение, наибольшая яркость которого имеет радиус менее чем в 5 раз больше, чем диск Эйри. Такой рассеянный свет может стать серьезной проблемой, поскольку он достаточно конденсирован, чтобы его можно было легко увидеть.

Давайте сравним этот дефект с вероятным поведением микроряби. Тексеро утверждает, что микрорябь иногда достигает 6 нм на волновом фронте и имеет средний интервал всего 1 мм (Твупан 1988, стр. 580). Однако нам повезло, что наклон каждой грани толщиной 1 мм редко коррелирует с наклонами соседних граней, поэтому эффективные апертуры граней объединяются только статистически. Этот 6-нм вариант также является худшим; большинство волновых фронтов имеют микрорябь размером менее 1 нм ($<1/500$ длины волны). Из-за малых размеров и отсутствия корреляции рассеивающих поверхностей картина дифракции рассеянного света от микроряби представляет собой разбитое тусклое свечение, весьма похожее на ауру, возникающую с загнутым краем. Микрорябь небольшой амплитуды трудно обнаружить с помощью теста Фуко. Для однозначного обнаружения требуется специальное оборудование.

Когда шероховатость мала, как в оптике, она лишь незначительно влияет на дифракционную форму изображения. Он удаляет свет из сфокусированного изображения.

и выталкивает его в пятнистый ореол малого диаметра для первичной ряби и большого диаметра для микроряби. Недостающая энергия рассчитывается путем наблюдения за тем, насколько уменьшилась центральная интенсивность.

Коэффициент шероховатости Штреля можно рассчитать приближенно (Борн и Вольф, 1980, стр. 464). Здесь α представляет собой соотношение Штреля при лучшем фокусе иЦТРС- среднеквадратичное отклонение волнового фронта (в длинах волн), измеренное от эталонной сферы с центром в наилучшем фокусе:

$$\alpha \approx 1 - (2\sigma_M)^2 \quad (13.1)$$

Например, среднеквадратичное отклонение длины волны /14,05 дает коэффициент Штреля 0,8 (допуск Маршала). А ошибка длины волны /20, типичная для заметной первичной пульсации, дает коэффициент 0,9. В тяжелом случае микропульсации отклонение может достигать 1/100 длины волны, поэтому интенсивность снижается только до 0,996. Очевидно, что микрорябь имеет совершенно иной характер, чем первичная пульсация.

Другое приближение к коэффициенту Штреля было дано Махаджаном (1982):

$$\alpha \approx e^{-2\sigma^2} \quad (13.2)$$

(σ^2 — (2R) среднеквадратичное значение)

Это дает более точное число, чем уравнение. 13.1 при больших амплитудах аббераций. Мы можем инвертировать уравнение. 13.2 $\alpha = 0,8$, чтобы определить «толерантность Махаджана» примерно 1/13 длина волны RMS. Однако для малых шероховатостей разница между этими приближениями незначительна.

13.2 Терминология шероховатости

Мы должны отличать номенклатуру от реальности поверхностных ошибок. Шероховатость обычно моделируется либо как *непрерывный* спектр от крупного масштаба к мелкому или в виде прерывистого *составная шкала* спектр. «Спектр» в этом случае состоит не из графиков интенсивности света в зависимости от цвета, а из зависимости величины шероховатости от шкалы ширины. Сложный масштаб представляет собой что-то вроде огромных волн воды, на которые наложены крошечные капиллярные волны, переносимые ветром, — плавные волнистости со складками. Терминология, называющая шероховатость размером внахлест «первичной рябью», а небольшую шероховатость «микрорябью», основана на предположении, что две отдельные причины создают шероховатость сложного масштаба.

Я видел зеркала, которые, очевидно, очень хорошо подчинялись этой составной модели. Они были покрыты гладкой, волнистой шероховатостью, в которой мало что было от мелкой шероховатости между первичной рябью и микроволнами. Однако чаще всего зеркала кажутся все менее и менее шероховатыми при уменьшении масштаба, но не существует единого масштаба, при котором тестирующий мог бы сказать,

ограничители шероховатости (пример показан на рис. 13-1). Такие названия, как «первичная рябь», на таких поверхностях значат меньше, потому что чуть ниже нее всегда есть шкала. Мы могли бы назвать ее шкалой «не очень большой пульсации», за которой следует шкала «еще меньшей пульсации». Модель, описанная ниже, следует этому поведению непрерывного спектра вместо составного масштаба, на котором основана терминология. Эти слова будут продолжать использоваться, потому что они удобны и прочно вошли в литературу.

Другая причина использования искусственного разделения шероховатостей на средние и мелкие заключается в том, что они обычно встречаются в разных испытаниях. Тест Фуко хорош вплоть до небольшого масштаба шероховатости, промежуточного между первичной и микрорябью, но затем его чувствительность теряется. Исследование микропульсации требует проведения теста на фазовые помехи, который намеренно подавляет чувствительность к крупномасштабным ошибкам.

13.3 Среднемасштабная шероховатость или первичная пульсация

Внешний вид зеркала, страдающего от первичной пульсации, показан на фотографии теста Фуко на рис. 13-1. Грубость проявляется только в центре зеркала при этой установке ножа. Пульсация распространяется на светлые и темные области, хотя в этих областях она менее заметна. Шероховатость смутно видна как случайная структура с набором наложенных друг на друга канавок, начинающихся в центре и идущих наружу.

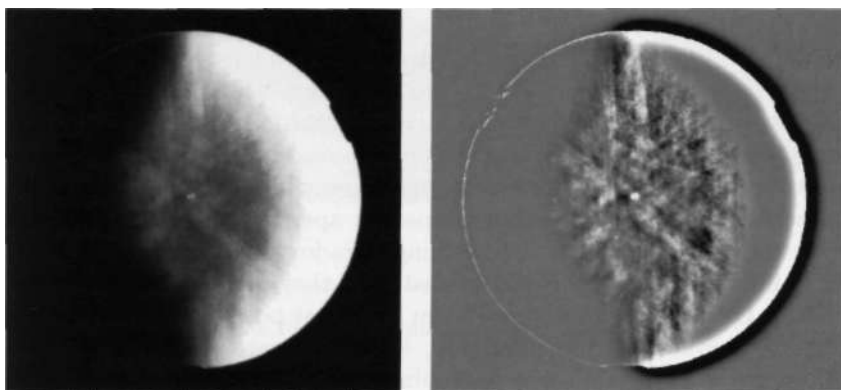


Рис. 13-1. Шероховатость видна в центральной зоне зеркала по тесту Фуко. Справа: контраст увеличивается за счет вычитания изображения с нерезкой маской..

Это 6-дюймовое (150 мм) зеркало с диафрагмой $f/5$ было произведено во время производственного бума во время последнего возвращения периодической кометы Галлея и является типичным примером небрежной производственной практики того времени. Как бы плохо это ни выглядело, шероховатость оценивается где-то между $\lambda/10$ или $\lambda/20$ длина волны RMS (шероховатость от пика до впадины между $\lambda/3$ и $\lambda/5$ -длина волны). Сферическая aberrация

Во время этого стендового испытания также была обнаружена сверхкоррекция, составляющая 1 длину волны. Очевидно, сферическая аберрация была самым большим недостатком.

Ваш глаз также страдает от шероховатости средней степени. Возьмите алюминиевую фольгу и проткните ее булавкой. Держите фольгу на расстоянии примерно 8–15 см перед глазом и посмотрите через отверстие на матовую лампочку накаливания. Постарайтесь сфокусировать взгляд на лампе, а не на точечном отверстии, и прикройте другой глаз. Если вы проделали в фольге отверстие нужного размера, вы должны увидеть пятнистый диск, который примерно соответствует узорам расфокусировки, представленным в этой книге. Внешнее кольцо, пожалуй, единственное, что четко очерчено. Внешний вид можно немного улучшить, поместив цветной фильтр между лампой и точечным отверстием.

Когда вы моргаете, на расфокусированном диске ненадолго появляются горизонтальные линии. Вы можете видеть, что некоторые детали меняются при каждом моргании. Вероятно, они вызваны изменениями толщины влаги на роговице. В зависимости от яркости света вы также можете увидеть тусклые радиальные шипы за пределами диска. Эти всплески могут быть вызваны дифракцией от некруглого отверстия диафрагмы или полос на неровностях.

Шероховатость проявляется как шероховатость расширенного диска. Эта грубость не меняется от моргания к морганию. Аберрация составляет много длин волн, поэтому внешний вид отдельных колец неясен и запутан. Когда мне было 19, мне удалили кусок металла из роговицы, и следы травмы до сих пор можно увидеть на расфокусированном изображении. Шероховатость может возникать из-за дефектов роговицы, шероховатости поверхности хрусталика и неоднородности показателя преломления хрусталика.

Человеческий глаз даже близко не ограничен дифракцией. Глаз с отверстием радужной оболочки 3 мм (типично при дневном свете) теоретически может различать линии, разделенные 0,6 угловой минуты, но считается, что человек, который различает линии, разделенные всего 1 угловой минутой, обладает отличным зрением. Как мы можем проверить телескопы на дифракционный предел через такую неидеальную апертуру?

На самом деле ответ на этот кажущийся парадокс довольно прост. Угловые погрешности прибора увеличиваются до тех пор, пока они не превысят погрешности глаза. Как только расстояние между мельчайшими возможными деталями превысит 5 угловых минут (т.е. 1/6 диаметра Луны), аберрации телескопа начинают доминировать над аберрациями глаза. Апертура 1 дюйм должна разрешать линии, разделенные 0,092 угловых минут, поэтому достаточный размер изображения достигается при 5/0,092. ≈ 50 сил/дюйм (20 сил/см). Где-то за пределами этого увеличения даже идеальные телескопические изображения начинают становиться нечеткими.

По иронии судьбы, некоторые люди хвастаются телескопами, которые могут «выдерживать мощность более 100 крат на дюйм» (40 на см). Чего они не понимают, так это того, что они не хвастаются телескопами. Они непреднамеренно признают низкую остроту своего зрения. При использовании чрезвычайно высокой магнитной

При размерах выше 100/дюйм дифракционный диск кажется больше, чем две трети углового диаметра полной Луны.

13.3.1 Аберрационная функция среднемасштабной шероховатости

Для создания грубых волновых фронтов снова используется фрактальная модель, описанная в главе о турбулентности, с некоторыми модификациями.

Первое изменение заключается в подавлении отклонений средней точки для двух итераций. Этот шаг гарантирует, что сгенерированные таким образом поверхности будут некоррелированы на расстояниях, превышающих $1/8$ до $1/4$ апертуры. Никто не ожидает, что шероховатость среднего масштаба сохранится на больших расстояниях, и, не позволяя поверхности отклоняться до тех пор, пока она не будет разделена на сетку из 16 квадратов, такой масштаб корреляции достигается. Лишь 16 точек из почти 13 000 искусственно зажаты до нуля, но меняется весь характер поверхности.

Другая модификация заключается в том, чтобы избежать снижения шероховатости. На рис. 13-1 показаны мелкие детали в масштабах, меньших, чем расстояние между инструментами (предположительно около $1/8$ диаметра). В случае турбулентности было желательно подавить отклонение в небольшом масштабе, поскольку не существовало механизма, способного его вызвать. Ячейки турбулентности имеют квазипериод около 10 см. Шероховатость стекла, поскольку она возникает по многим причинам в различных масштабах, будет смоделирована здесь как самоподобный фрактал.

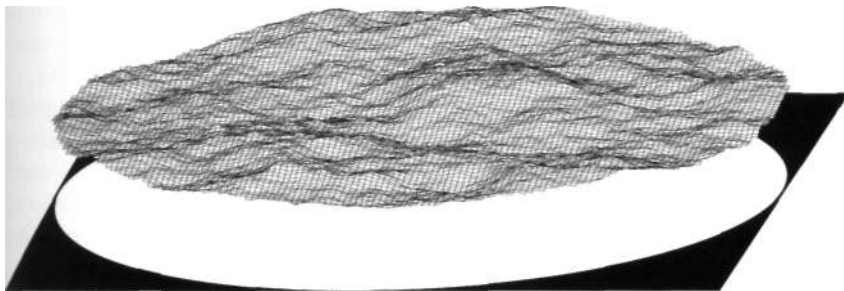


Рис. 13-2. Аберрационная функция средней шероховатости, также называемая «первичной рябью» или «собачьим бисквитом».

На рисунке 13-2 показан пример аберрационной функции шероховатости среднего масштаба. Полосы, видимые на рис. 13-1, не представлены в этом алгоритме. Можно ожидать, что такие канавки будут преломлять свет на малоконтрастные шипы, расположенные под прямым углом к их протяженности (как это делает флюгер). Однако нам не следует переоценивать их значение. Система зрительного восприятия пытается создать порядок в том, что мы видим. Он особенно любит прямые линии и часто создает линию там, где на самом деле присутствует лишь намек на нее. Пояс Ориона, например, сильно изогнут. Глаз навязывает линейность, потому что

предпочитаем линейность.

13.3.2 Эффекты фильтрации среднemasштабной шероховатости

Поскольку масштаб шероховатости намного меньше, чем вся апертура, можно ожидать резкого падения на низких пространственных частотах, состояния, подобного перевернутому краю. После этого MTF должен оставаться довольно фиксированной частью идеального MTF. Таким образом, среднее ухудшение падает от единицы до константы примерно на длине корреляции (Шредер 1987, стр. 208). На рис. 13-3 мы видим, что предыдущее предположение о корреляционной длине $1/4$ до $1/8$ диафрагмы – это хорошо. Провисание кривых, похоже, достигло постоянной доли MTF идеальной диафрагмы примерно на этом расстоянии.

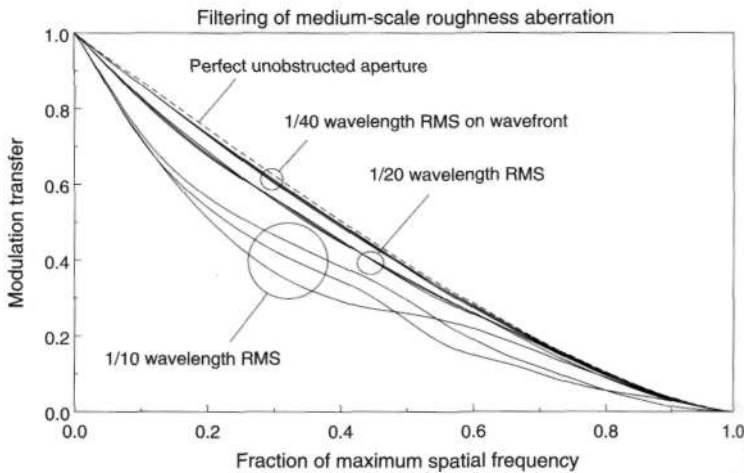


Рис. 13-3. Фильтрация, вызванная первичной пульсацией. Показаны три величины: среднеквадратичное отклонение волнового фронта длин волн 0,1, 0,05 и 0,025.

Аберрация шероховатости несимметрична, поэтому для целевых шаблонов строятся три кривые с полосами, ориентированными вверх-вниз, влево-вправо и под углом 45° . Поскольку эти кривые представляют собой единственную реализацию шероховатой поверхности, а не среднее значение для многих таких поверхностей, MTF несколько покачивается. Эти кривые являются примерами изменений, которых можно ожидать от изменений в ориентации цели MTF или от слегка отличающихся поверхностей.

Ухудшение является серьезным для среднеквадратичных волновых фронтов с длиной волны 0,1, но оно быстро улучшается при меньших неровностях. Качество приемлемо для неровностей волнового фронта менее 0,05 длины волны RMS. Некоторые производители

гарантируют плавность оптики, но они всегда дают характеристики на поверхности, а не на волновом фронте. Читайте претензии внимательно.

Также показан гладкий волновой фронт со среднеквадратичным отклонением всего $\lambda/40$ длина волны ($\lambda/80$ длины волны на поверхности зеркала). Если проявить разумную осторожность, всю астрономическую оптику можно сделать такой гладкой. Глобальные aberrации волнового фронта трудно уменьшить ниже $\lambda/28$ длина волны RMS ($\lambda/8$ длины волны от пика до впадины), но оптику можно легко сгладить до тех пор, пока шероховатость волнового фронта не станет менее $\lambda/40$ среднеквадратичное отклонение длины волны.

13.3.3 Звездный тест на шероховатость среднего размера

Два фокуса показаны на рис. 13-4 и рис. 13-5. Первый представляет собой последовательность изображений идеального во всем остальном $\lambda/40$ -волновой среднеквадратичный фронт шероховатости. Несмотря на то, что волновой фронт очень хороший, на расфокусированных изображениях заметна шероховатость. На рисунке 13-5 aberrация удваивается, и используется другой волновой фронт, полученный из фракталов. Этот Среднеквадратическая диафрагма $\lambda/20$ длины волны приемлема для диаграммы MTF, но она серьезно искажает расфокусированные изображения. К счастью, кажется, что он убирает беспорядок, видимый вне фокуса, и дает довольно четкий рисунок в фокусе. Если бы эта закономерность представляла собой турбулентность, она имела бы по крайней мере 9 баллов по шкале Пикеринга от 1 до 10.

Мы проходим примерно 8 длин волн по обе стороны от фокуса (Таблица 5-1). Если волновой фронт имеет первичную пульсацию, близкую $\lambda/40$ длины волны RMS, влияние шероховатости очень деликатно и его трудно обнаружить. В $\lambda/20$ длины волны RMS (приблизительно предел того, что вы должны терпеть), вы увидите это слишком ясно.

Часто вам приходится проверять шероховатость наряду с некоторой сферической aberrацией. Шероховатость легче увидеть на стороне фокуса с мягкими краями. Тусклые внешние части диска образуют скрученный узор, похожий на звездочку. Не концентрируйтесь на шероховатости, пока не определите, что сферическая aberrация приемлема. Ошибки сферической коррекции гораздо более вредны для изображений с высоким разрешением, чем ошибки шероховатости, поскольку их масштаб ширины очень велик.

13.3.4 Шероховатость и турбулентность

Турбулентность очень похожа на неровности, поэтому она сильно мешает звездному тесту на предмет этой aberrации. Таким образом, шероховатость практически невозможно проверить в реальном небе с помощью настоящей звезды. Ночи, когда воздух абсолютно неподвижен, настолько редки, что никогда не совпадут с намеренно запланированным звездным испытанием. Кроме того, звездные испытания — последнее, чем хочет заниматься наблюдатель в ночи исключительной устойчивости.

Искусственный источник часто имеет решающее значение для проверки шероховатости. Кроме того, тестирушки не могут проверить первичную пульсацию в любое время и в любом месте. Они должны попытаться найти удачное сочетание времени и места, которое приведет к спокойному испытанию.

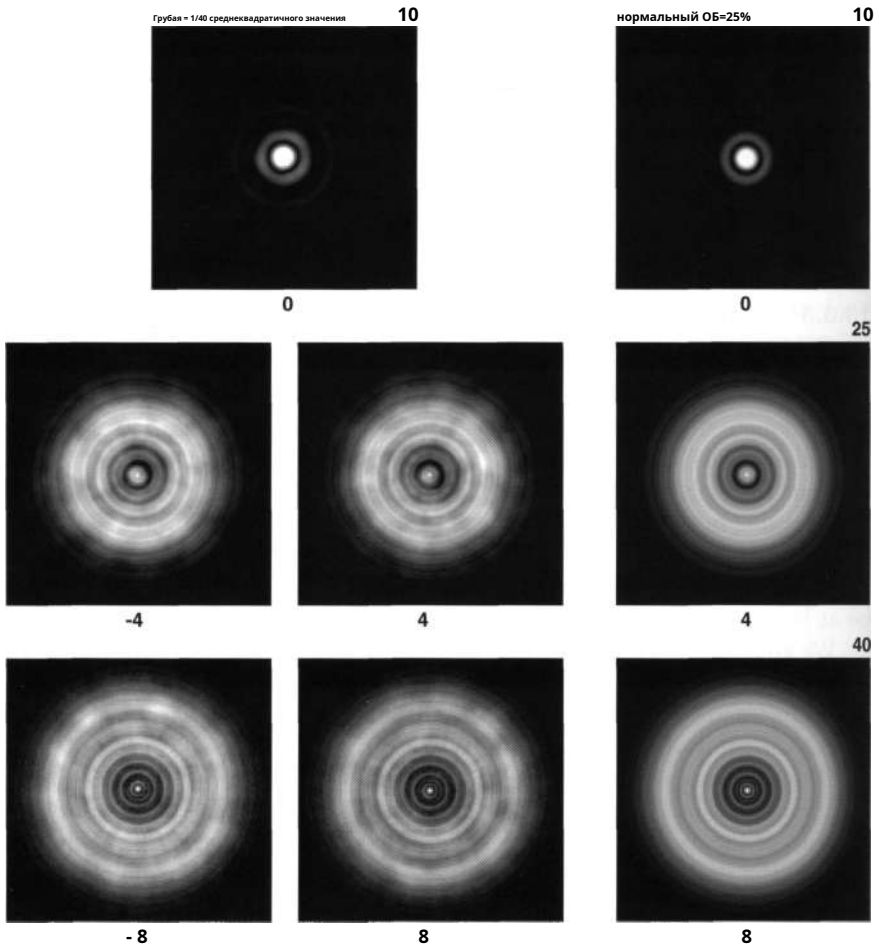


Рис. 13-4. Среднемасштабная шероховатость $1/40$ среднеквадратичное значение длины волны с абберацией дефокусировки от -8λ $+ 8$ длин волн. Препятствие составляет 25 %, а в правом столбце видно идеальное изображение.

путь. Возможно, необходимые условия возникнут ночью, когда температура не будет падать слишком быстро. Наиболее вероятные хорошие испытания проводятся безветренным вечером или очень ранним утром над травой. Тест с искусственным источником проходит лучше всего, когда фонарик и сфера устанавливаются в яркий период после захода солнца, но до того, как сумерки закончатся. Используйте Солнце, чтобы осветить сферу ранним утром. Если это время трудно организовать, проверьте шероховатость с помощью искусственного источника ночью. (См. Хуфнагель

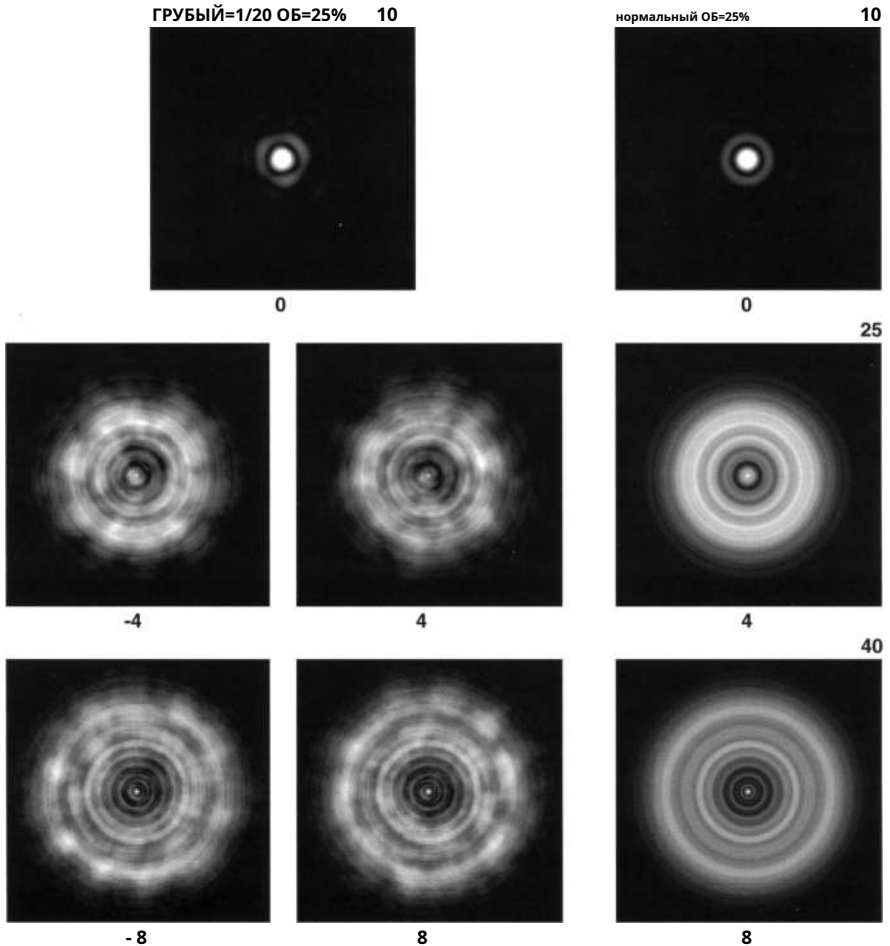


Рис. 13-5. Еще один фронт первичной пульсации, на этот раз имеющий статистическое отклонение $1/20$ длина волны RMS, фокусируется от -8 до $+8$ длин волн. Гладкий волновой фронт находится справа.

1993, стр. 6–12.)

Кроме того, вы должны быть реалистичны в своих ожиданиях. Шероховатость важна только в том случае, если она составляет разумную часть аналогичной абберации турбулентности. Таким образом, шероховатость считается нежелательной только в том случае, если ночью оказывается, что турбулентность меньше всего влияет на телескоп. Если при настройке теста изображение немного мерцает, результат не бесполезен.

Посмотрите, виден ли фиксированный рисунок шероховатости даже на относительно

световая турбулентность перед искусственным источником. Если вы не можете различить фиксированный рисунок шероховатости в этих превосходных условиях, то можете быть уверены, что во время реального использования шероховатость мало влияет на изображение.

Масштаб также должен немного сдвинуться, чтобы приспособиться к местным условиям. Если зрение в вашем регионе ужасное в течение 99% ночей, возможно, неровности менее важны. В местах с хорошей видимостью стандарты шероховатости должны быть более строгими.

Если шероховатость по-прежнему крайне нежелательна даже после принятия во внимание этих смягчающих условий, оптику необходимо переконфигурировать.

13.4. Мелкомасштабная шероховатость, или микрорябь.

Первоначальное беспокойство по поводу микроряби связано с попытками в начале 20-го века наблюдать за солнечной атмосферой постоянно, а не только во время солнечных затмений. Солнечная корона — это тонкий высокотемпературный газ, простирающийся на несколько солнечных диаметров. Наблюдения во время затмений были превосходны, но напоминали нечастые снимки. Ученым нужен был метод ежедневного наблюдения за внутренней короной и отслеживания ее изменений. Корона ярче полной Луны, но она может затеряться рядом с адской яркостью Солнца.

Чтобы создать телескоп, способный блокировать паразитно-рассеянный свет, требуются более совершенные методы, чем эмпирические рецепты, обычно используемые астрономами. Андре Кудер заявил, что интенсивность короны в 5 угловых минутах от закрытого изображения Солнца составляет лишь примерно 1 миллионную от интенсивности света, исходящего от незаблокированного Солнца. Даже неоднородности стекла линзы его коронографа рассеивали свет лишь чуть менее интенсивно. По его оценкам, рассеяние от атмосферы, даже на чистой вершине горы, было примерно вдвое менее интенсивным, чем от короны, а рассеяние от наиболее тщательно очищенной линзы было столь же ярким (цитата по Твуман 1988, стр. 585). Очевидно, что контраст уже сильно пострадал от неизбежных эффектов, и для рассеяния микрорябью оставалось мало места. Тяжелый! Пример среднеквадратичного среднеквадратичного значения длины волны /100, упомянутый выше Тексеро, был бы неприемлем. Он рассеивает 0,4% энергии, попадающей в апертуру, что более чем в тысячу раз превышает яркость.

Тексеро также описывает тонко отполированную поверхность с микрорябью со среднеквадратичным отклонением примерно 0,05 нм или около 1/11 000 длин волн. Это значение вставлено в уравнение. 13.1 приводит к уменьшению интенсивности ($2\pi/11\,000$).от 1 или только 3×10^{-7} . Это крошечное количество рассеянного света было бы еще менее интенсивным к тому времени, когда его рассматривали под углом 5 угловых минут. Такая поверхность достаточно гладкая, чтобы ее можно было использовать в коронографе (Тексеро, 1984, стр. 88).

Оптика, демонстрирующая первичную пульсацию на рис. 13-1, практически не требует внимания к относительно незаметному эффекту микроряби. Фактически, фрак-

Тальная модель среднемасштабной шероховатости автоматически включает умеренное количество микроряби (около $1/1000$ длины волны RMS), но наличие более грубой шероховатости доминирует в меньшем масштабе.

Тем не менее, мы хотим выяснить, что происходит, когда первичная пульсация устранена и остается только мелкомасштабная шероховатость. Микрорябь часто обвиняют в низкой контрастности. Может ли эта загадочная шкала шероховатости быть причиной стольких оптических проблем?

13.4.1 Аберрационная функция мелкомасштабной шероховатости

Фрактальный алгоритм не использовался в модели микроряби, поскольку мы хотим удалить среднемасштабные особенности и сконцентрироваться только на мелкомасштабных эффектах. Генератор псевдослучайных чисел использовался для назначения высот сетке зрачков 128×128 . Поскольку ожидалась асимметрия, тяготеющая к плоским вершинам с более острыми канавками, из этой исходной поверхности был взят квадратный корень, и результат был нормализован. Поверхность показана на рис. 13-6..

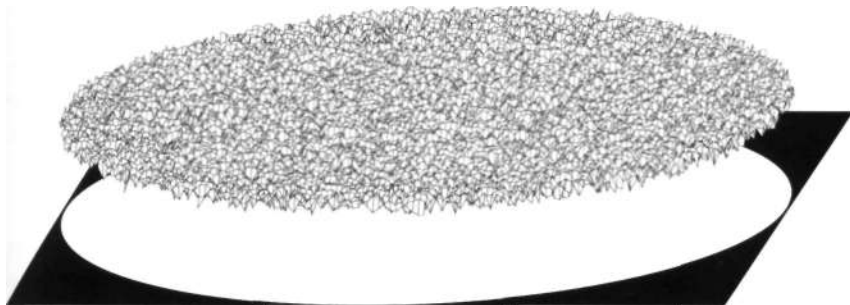


Рис. 13-6. Смоделированная поверхность микроряби с существенно расширенной амплитудой.

13.4.2 Фильтрация мелкомасштабной шероховатости

Рассмотрим сказанное выше о длине корреляции. Поскольку микрорябь имеет очень небольшую корреляционную длину (менее миллиметра или около того), мы должны ожидать резкого падения передаточной функции модуляции с последующим постоянным ухудшением. Эти эффекты проиллюстрированы на рис. 13-7. MTF быстро падает, а затем остается более или менее постоянной долей идеального значения.

Фактически, микрорябь размером с $1/10$ среднеквадратичное значение длины волны $1/10$ — маловероятное событие, хотя оно и присутствует на графике. Это показано только для того, чтобы сделать более очевидным быстрое начальное падение. Тексеро дал наихудшую сумму всего в $1/100$ длина волны. По поведению графиков MTF мы видим, что

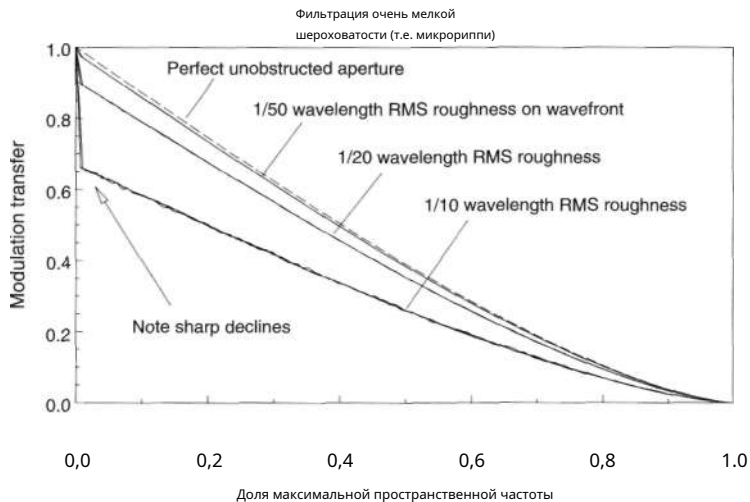


Рис. 13-7. Различные Кривые MTF, характерные для микрориппи. Появляющиеся здесь aberrации преувеличены, чтобы показать форму.

$\lambda/100$ Длина волны микрориппи будет неотличима от идеальной апертуры в большинстве ситуаций наблюдения в темном поле. Рассчитанные изображения мало отличались от совершенства, поэтому диаграммы звездных испытаний микрориппи здесь не приводятся.

13.4.3 Великое Неизвестное

Так почему же мы слышим всевозможные предупреждения об изнурительных последствиях микрориппи? Микрориппи — один из тех мифов о производстве телескопов, который питается народной мудростью и слухами. Частично проблема заключается в сложности его измерения. Тексеро описывает метод (придуманый Лио), для которого требуется ослабляющая фазовая пластина — специализированное устройство, которое задерживает и ослабляет распространение нерассеянного волнового фронта. Поскольку силу микрориппи нелегко измерить, его обвиняют в любых неустановленных оптических трудностях.

Также опубликованы описания конструкции необычных инструментов, таких как коронографы (где микрориппи *делает* вопрос), как правило, пугают читателей. Люди полагают, что микрориппи может повлиять на более прозаические формы обычного наблюдения. Свет, дифрагированный от слегка повернутого дальнего края, значительно сильнее, чем свет, исходящий от микрориппи. Почти каждый телескоп с незамаскированной кромкой дает гораздо больше рассеянного света, чем рассеяние, вызванное микронеровностями.

Вытянутые объекты подвергаются гораздо большему разрушению из-за препятствий, таких как крестовины, зажимы для зеркал и крошечные винты, выступающие со стороны вторичного держателя, чем из-за микрориппи. Например, пауки отклоняют больше

легче, чем любой вероятный случай мелкой шероховатости. Паук с четырьмя лопастями толщиной 0,5 мм на апертуре 200 мм дифрагирует 0,5% падающей энергии, что немного больше, чем у Тексеро.1/100-волновая микрорябь в худшем случае.

Среднеквадратическая погрешность микропульсации 0,5 нм (около 1/1000 длины волны) приводит к уменьшению коэффициента Штреля на 0,00004. Если этот недостающий свет распределяется по интересующему полю, это приводит к тому, что отношение сигнал/шум на протяженных объектах может достигать 44 дБ. Это значение находится между максимальным значением 30 дБ, определенным в главе 9 для грязной оптики, и SNR 55 дБ для хорошей магнитной ленты.

Однако для большинства наблюдений в темном поле микрорябь не очень вредна. Например, шероховатость шириной 1 мм рассеивает свет в ореол шириной около 100 угловых секунд. Возможно, 10% этой энергии покроеет изображение Марса длительностью 20 угловых секунд. Остальная часть рассеянного света находится за пределами края планеты и не загрязняет изображение. Таким образом, отношение сигнал/шум увеличивается до 54 дБ, что действительно является очень большим значением. Аналогией с отношением сигнал/шум 50 дБ является затемнение изображения Солнца, наблюдаемого через безопасный солнечный фильтр. Если бы сигнал представлял собой нефильрованное изображение Солнца, шум, вызванный микрорябью длиной 1000 волн будет примерно такой же сильной, как фильтрованное Солнце. Если вам нужен инструмент, способный различать тусклые детали рядом с ярким источником помех, вам, возможно, придется беспокоиться о микроряби. Мелкомасштабные неровности с низкой амплитудой не представляют угрозы для большинства наблюдателей.

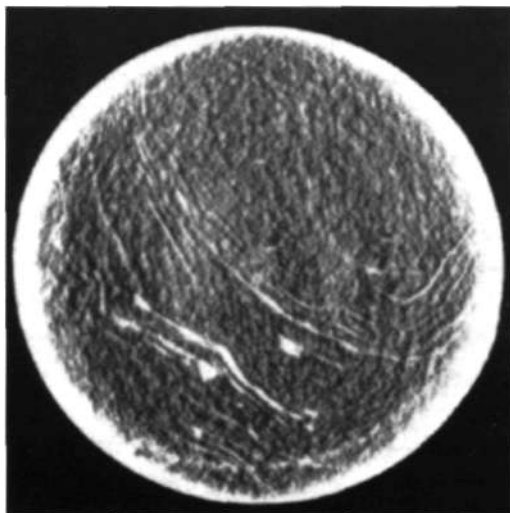


Рис. 13-8. Методика тестирования, разработанная Лео, выявляет на стекле микрорябь и прожилки различной твердости. (От Как сделать телескоп Жан Тексеро, авторские права © Willmann-Bell, Inc., 1984 г., используется с разрешения.)

Глава 14

Астигматизм

Астигматизм – это тенденция объектива фокусироваться на двух расстояниях. Каждое фокусное положение растянуто, одно под прямым углом к другому. Между ними находится средний фокус, изображение которого образует крестообразный узор. Из-за растяжения по углам креста, а также невозможности локализации однозначного фокуса резко снижается контрастность высокопространственной частотной информации. В этой главе будет обсуждаться ряд моментов:

1. Астигматизм имеет множество отдельных причин, и большинство из них можно вылечить за умеренные деньги или вообще без них.
2. Однозначное определение источника астигматизма требует тщательной логики (и, честно говоря, небольшой удачи).
3. Небольшую степень астигматизма можно обнаружить путем осторожного покачивания фокуса в направлении наилучшего фокуса.
4. Чтобы определить, имеет ли телескоп слишком большой астигматизм, нужно попытаться обнаружить некруглость изображения при калиброванной настройке фокуса.

14.1 Астигматизм в глазах и оптике телескопов

Астигматизм означает *не стигматично, или не фокусируясь на точке*. В самом широком смысле все несимметричные аберрации, обсуждаемые в этой книге, являются астигматическими. Симметричные аберрации могут давать нечеткие пятна, но они, по крайней мере, круглые.

Этот тип аберрации был первоначально определен Людвигом фон Зейделем и модифицирован Фрицем Цернике (Борн и Вольф 1980, стр. 470). Астигматизм

делит фокус на две короткие линии, разделенные небольшим расстоянием по направлению движения окуляра. Линии расположены под прямым углом друг к другу. Свообразный «лучший фокус» виден на полпути между ними, где рисунок освещения принимает форму креста.

Астигматизм часто корректируется в человеческом зрении.¹ *Цилиндрические* цифры в рецепте на очки являются поправками на астигматизм. Эта аберрация обычно вызвана деформацией роговицы или прозрачной внешней оболочки глаза. Астигматизм может возникнуть в результате более сильного «растяжения» роговицы в одном направлении, чем в другом, а также из-за деформации глазного яблока. В некоторых случаях аберрацию можно временно исправить, потянув за один угол века.

Например, мой правый глаз имеет силу цилиндра 2 диоптрии.² по оси 90° , а оптическая сила моего левого глаза составляет 2,5 диоптрии под углом 88° . Поскольку у меня также есть значительная коррекция фокусировки, я вижу точечные источники, вытянутые вверх в одном глазу и сплюснутые в другом. Ось приблизительно 90° , вероятно, не случайна; направление растяжения может быть связано с точками прикрепления мышц моего глаза или с формой орбитальных впадин в моей голове.

Простейшим примером астигматической линзы является цилиндр без кривизны в одном направлении и значительной кривизны в другом. Усеченные хорды цилиндров часто используются в лупах для чтения. Приложив лупу прямо к странице, можно подавить плохую фокусировку линзы и растянуть крошечные буквы в одном направлении.

Действительно цилиндрические линзы или зеркала почти никогда не используются намеренно и никогда не случаются случайно. Самая распространенная форма — гибридная сферической и цилиндрической формы. Фактически, можно полностью вычесть сферическую фокусирующую способность линзы и остаться с чисто астигматической формой.

Цилиндрическая линза, которая не фокусируется ни по одной оси, моделируется как часть тора. Тор имеет форму бублика. Конкретная форма, которая здесь наиболее интересна, имеет отверстие точно такого же диаметра, что и поперечное сечение тора. Рисунок такого бублика представлен на рис. 14-1, где половина тора отрезана, чтобы обнажить интересную область. Рассмотрим крошечный круг, нарисованный внутри отверстия. Когда эта круглая часть поднята от остальной части тора, она имеет ту же форму поверхности, что и астигматическая линза без фокусирующей способности (другая сторона линзы плоская). Кривая входит в бумагу в направлении вверх-вниз и выходит из бумаги влево или вправо. Представьте себе, что вы смотрите вниз на форму седла,

¹Более распространенной проблемой, решаемой в очках, являются *сферические* коррекции, которые представляют собой модификации фокусирующей способности глаз. «Сферический» для оптометриста относится к $A_2\rho_2$ фокусирующий член разложения уравнения. 10.2. Слова «коррекция сферической аберрации», используемые производителями телескопов, обозначают *Аджрок* этого расширения.

²Диоптрия — это обратная величина фокусного расстояния в метрах. Типичное фокусное расстояние небольшого телескопа 2 метра обеспечивает силу фокусировки всего 0,5 диоптрии.

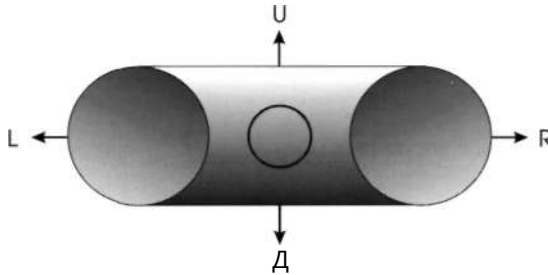


Рис. 14-1. Крошечный кружок внутри тора — это самая чистая форма астигматической деформации.

с направлениями влево-вправо к наверху и седлу и вверх-вниз к любому стремени.

Астигматические поверхности можно моделировать как комбинацию чисто сферических (т.е. фокусирующих) поверхностей и нефокусирующих тороидальных поверхностей. Если мы переместим крошечный кружок, показанный на рис. 14-1, наружу пончика, его поверхность больше не будет напоминать седло. Вместо этого это похоже на одну из этих гибридных поверхностей. У него меньшая астигматическая сила, чем раньше, с примесью некоторой сферической кривизны. В астигматизме настоящей линзы сходящийся волновой фронт на самом деле не имеет седловидной формы. Форма получается только после вычитания сферической фокусирующей составляющей.

14.2 Причины астигматизма

Астигматизм в телескопах является симптомом нескольких оптических проблем, некоторые из которых перечислены здесь:

1. Смещение (часто сочетающееся с комой).
2. Плохая поддержка веса оптики, вызывающая давление, направленное вдоль оси («провисание «картошки»).
3. Якобы плоская диагональная или прямоугольная призма, которая на самом деле имеет слегка сферическую форму (на удивление распространенная проблема).
4. Небольшая цилиндрическая деформация, отшлифованная или отполированная до стекла (очень небольшое количество встречается в большинстве зеркал и линз).
5. Плохо отоженное стекло (часто встречается в зеркалах-иллюминаторах или других толстых изделиях, изготовленных для другого применения).
6. Некомпенсированный астигматизм глаза наблюдателя.

Наиболее губительными из этих причин являются номер 4 — истинный астигматизм, притертый или отполированный до поверхности, и номер 5 — неослабленные напряжения, содержащиеся в самом стекле. Экономия денег за счет использования недокументированного стекла для

Зеркальная подложка — это риск, который многие производители готовы принять, и зачастую он им сходит с рук. Однако астигматизм, происходящий из других источников, не менее нежелателен. К счастью, эти причины легко устранить.

В те времена, когда все зеркала были маленькими и толстыми по сравнению с их диаметром, астигматизм был сравнительно редок. Даже нерешительное соблюдение практики оптического цеха по вращению инструмента относительно зеркала обычно сохраняло астигматизм в дремлющем состоянии. Только когда напряжения были заморожены в сам зеркальный диск (причина №5), появился астигматизм.³

Причина № 4 стала более распространенной сейчас, когда появились большие и тонкие зеркала. Даже осторожные оптики могут отполировать цилиндрические кривые до такой гибкой поверхности. Если появляются условия, которые приводят к астигматизму, они обычно зависят от того, как зеркало поддерживалось во время шлифовки или полировки, и поэтому сохраняются. Астигматизм, если он вообще проявляется в таких зеркалах, обычно бывает тяжелым.

Выявление причины наблюдаемого астигматизма и определение возможных стратегий его устранения требует методической, но простой детективной работы. Этот процесс будет описан в разделе 14.5.

14.3 Аберрационная функция астигматизма

Термин, добавленный к функции аберрации волнового фронта для учета только астигматизма, равен (Борн и Вольф 1980, стр. 470)

$$W_{\text{Астиг}}(\rho, \theta) = A_{\text{Астиг}} \rho^2 \left(\text{потому что: } \theta = \frac{1}{2} \right) \quad (14.1)$$

Здесь $A_{\text{Астиг}}$ — коэффициент, задающий амплитуду астигматизма, ρ — расстояние от оси и θ — угол от оси астигматизма. Константа $\frac{1}{2}$ вычитается из $\cos 2\theta$ — это необходимый сдвиг фокуса для возникновения аберрации наилучшего фокуса Цернике. Ниже ось астигматизма удобно расположить под углом 0° , но она может располагаться под любым углом. $W_{\text{Астиг}}$ представлен на рис. 14-2.

Например, если $A_{\text{Астиг}}$ составляет $\frac{1}{4}$ длины волны, тогда $W_{\text{Астиг}}$ идет от $+1/8$ длина волны до $-1/8$ длины волны. Это определение немного отличается от обычного для первичного астигматизма. Коэффициент $A_{\text{Астиг}}$ — это общая аберрация от пика до впадины, и это число, которое наиболее близко соответствует допуску Рэлея.

³Если виноват сам диск, Рассел Портер предлагал краткое, хотя и окончательное решение: «Найдите хороший, твердый и прочный гидрант. Швырните зеркало как можно сильнее в этот гидрант. Идите домой». (Ингаллс, 1976).

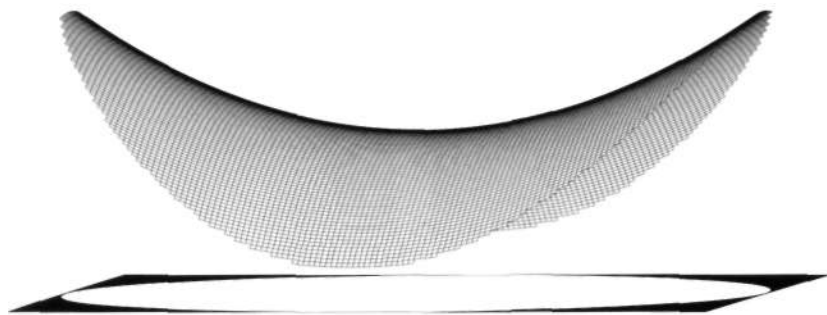


Рис. 14-2. Седловидная аберрационная функция астигматизма сразу после его возникновения прошедший через отверстие.

уравнение 14.1 имеет две интересные особенности. Первый — это то, как астигматизм масштабируется с расстоянием от оси. Он обладает той же силой, ρ_2 , как аберрацию дефокусировки, поэтому астигматизм можно интерпретировать как патологическую форму дефокусировки. Также при дефокусирующей аберрации $A_2 = \pm(1/2)A_{\text{дефок.}}$ аберрация становится плоской вдоль одной линии, причем линия значения «+» ориентирована под прямым углом к линии значения «—». Этот факт демонстрирует, что для каждой оси зеркала существует оптимальная фокусная точка и что эти оптимальные фокусы находятся по обе стороны от обычного фокуса. Наилучшее положение фокусировки — это компромисс между этими осями.

Разделение фокальных областей лучше всего видно на рис. 14-3, где тот же продольный срез через фокус виден сначала сбоку, а затем сверху. Взгляды являются зеркальными противоположностями друг друга. Примерными линиями самого яркого фокуса являются трехлопастные структуры крыльев, только одна из которых присутствует на каждой диаграмме. Маленький яркий ромб, который появляется спереди или сзади крыла, — это всего лишь другое крыло, если смотреть с торца. Если бы эти срезы можно было воспринимать в трех измерениях, можно было бы увидеть пару освещенных областей, отдаленно напоминающих бумеранги, расположенных под прямым углом друг к другу и перекрывающихся нос к носу.

По мере того, как астигматизм ухудшается, яркая область становится все меньше похожей на крыло, а больше на длинную полосу. Два стержня разделяются и раздвигаются. На диаграмме яркие области разделяются и становятся больше похожими на линии.

Лучшая картина дифракции фокуса сжимает кольца на две полосы для небольших аберраций (см. рис. 14-4). Для больших величин (многих длин волн) астигматизма лучший фокус (если какой-либо фокус можно назвать «лучшим») напоминает квадратную корзину. При аберрации длиной 1,5 длины волны наблюдается провал интенсивности на оси или узловой минимум. Расфокусировав до $\pm 0,75$ длины волны, мы видим крылья на рис. 14-3 такими, какими они выглядели бы лицом к лицу на

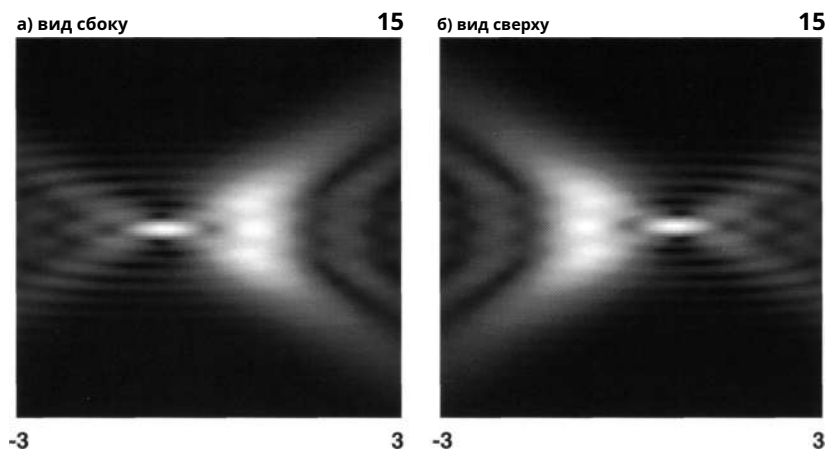


Рис. 14-3. Два шаблона срезов, изображающие 1,5 длины волны астигматизма. Размер каждого кадра вверх-вниз составляет 15 угловых единиц ($1,22 = \text{Эйри радиус}$). Расфокусировка находится между 3и 3 длины волны. Лучший фокус — в центре.

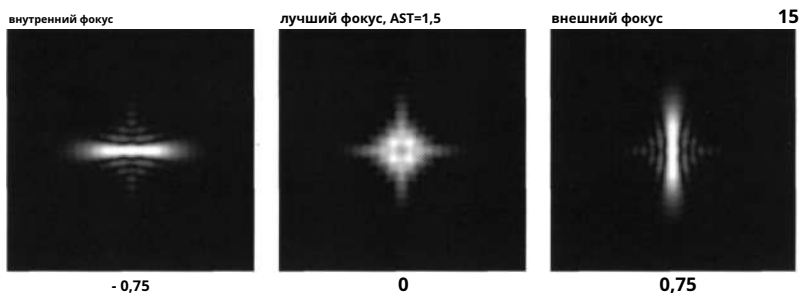


Рис. 14-4. Сильный астигматизм (общая абберация 1,5 длины волны): внутренний фокус, лучший фокус, внешний фокус.

окуляр.

Еще одна интересная особенность уравнения. 14.1 заключается в том, что тороидальная форма аппроксимируется параболической радиальной зависимостью. Как и в случае со сферической абберацией, в этом разложении также есть члены более высокого порядка, но их обычно игнорируют.

14.4 Фильтрация астигматизма

Поскольку астигматизм не является кругово-симметричным, передаточная функция зависит от того, как ориентирована мишень MTF. Следовательно, на рис. 14-5 показан каждый

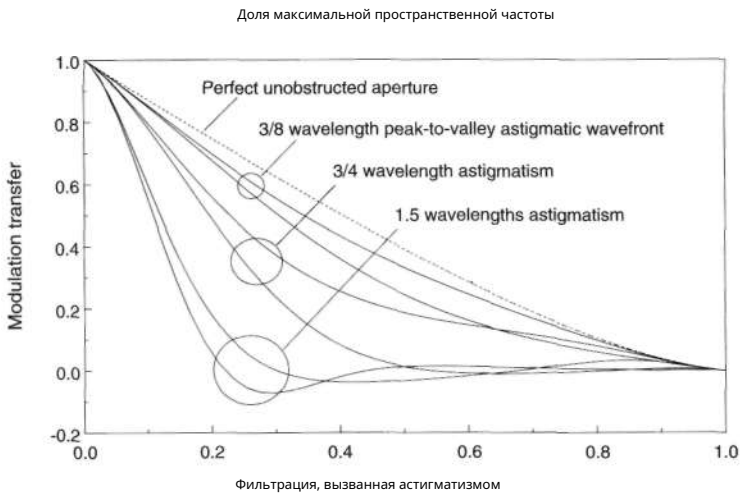


Рис. 14-5. Передаточные функции модуляции при астигматизме в лучшем случае фокус. Показаны три суммы: $\lambda/8$ длина волны, $\lambda/4$ длина волны, $1,5$ длины волны. Отклонение от $\lambda/8$ находится недалеко от предела Маршалля (коэффициент Штреля $0,8$). В каждой паре нижняя кривая – для баров MTF, ориентированных вдоль топоры астигматизма. The более высокая кривая предназначена для баров под 45° .

величину aberrации в виде двух линий со всеми промежуточными кривыми MTF примерно между ними. Очевидно, что астигматизм крайне вреден при длине волны $1,5$ длины волны. Коэффициент Штреля $0,8$ возникает при значениях немногим менее $\lambda/8$ длины волны от пика до минимума.

Поскольку он влияет на апертуру в том же масштабе, что и дефокусировка, астигматизм представляет собой в первую очередь ошибку пространственной частоты от средней до высокой. Он лишь незначительно влияет на передачу контраста на низких пространственных частотах. Передаточная функция астигматизма не падает так быстро с увеличением пространственной частоты, как MTF для первичной сферической aberrации или обструкции. Однако посмотрите на его производительность на средней пространственной частоте. Самая низкая кривая даже для минимально приемлемого Диапазон длин волн $\lambda/8$ снижает MTF в среднем до 70% от идеального значения.

Деградация достигает минимума на нижней кривой $\lambda/4$ -длина MTF примерно на $0,5$ максимальной пространственной частоты. При апертуре 200 мм наиболее сильно повреждаются детали с расстоянием около $1,2$ угловых секунды и менее. Поскольку астигматизм воздействует на высокие пространственные частоты, его наихудшее поведение сохраняется для лунно-планетарных наблюдений. Эта aberrация может частично объяснить плохую репутацию ньютоновцев с тонкими зеркалами для наблюдений при большом увеличении.

14.5 Шаблоны звездного теста

Фокус-прогоны звездного теста показаны на следующих двух рисунках. Величина аберрации на рис. 14-6 равна $\lambda/4$ длины волны. Оно показано таким, каким оно выглядело бы при 20% обструкции. На рис. 14-7 показаны эффекты $\lambda/8$ длины волны беспрепятственного астигматизма. Признаком астигматизма являются противоположно направленные овалы по обе стороны от фокуса. Напомним, что эти диаграммы рассчитываются с использованием оси астигматизма, совмещенной с квадратом. При реальных наблюдениях при астигматизме не требуется сидеть прямо. Его можно увидеть под любым углом. По мере увеличения расфокусировки рисунок становится менее эллиптическим. На этих рисунках дефокусировка незначительна, поскольку астигматизм наиболее сильно влияет на высокие пространственные частоты и легче всего обнаруживается вблизи фокуса.

Фактически, наиболее полезный метод обнаружения астигматизма — это сфокусировать более тусклую звезду, а затем покачивать окуляр взад и вперед поперек фокуса. Астигматизм растягивает изображение сначала в одну сторону, затем в другую, и аберрация сразу становится очевидной. Сфокусированное изображение должно выглядеть как крест, но у вас могут возникнуть проблемы с просмотром дифракционного диска в телескопах, в которых вероятен астигматизм. Более распространены отверстия, которые лишь намекают на рисунок, как на рис. 14-7.

Если наблюдается эллиптичность, обратитесь к Таблице 5-1 и определите, насколько далеко вам нужно переместить окуляр, чтобы расфокусировать 4 длины волны. Для фокусного расстояния $f/6$ эта величина составляет всего 0,025 дюйма или 0,63 мм. Расфокусируйтесь так далеко и внимательно рассмотрите изображение тусклой звезды. Если диаграмма явно эллиптическая, у телескопа слишком сильный астигматизм. В идеале астигматизм трудно обнаружить при дефокусировке на двух длинах волн.

Однако не удивляйтесь, если большинство телескопов страдают от этой аберрации, хотя бы из-за вездесущей силы гравитации. Лишь немногие инструменты имеют его.

14.6. Идентификация в ньютоновских отражателях.

Тот факт, что прибор страдает астигматизмом, не обязательно означает, что проблема кроется в стекле. Обнаружить астигматическую ошибку легко; определить его источник сложнее.

Прежде всего определите, является ли ваш собственный глаз причиной астигматизма. Простое использование другого глаза для просмотра в телескоп часто не помогает (см. мой рецепт выше), так что это не способ определить. Вы можете попробовать повернуть голову относительно окуляра и посмотреть, следует ли за ней астигматическая ось, но изменения, вызванные таким небольшим вращением, трудно заметить.

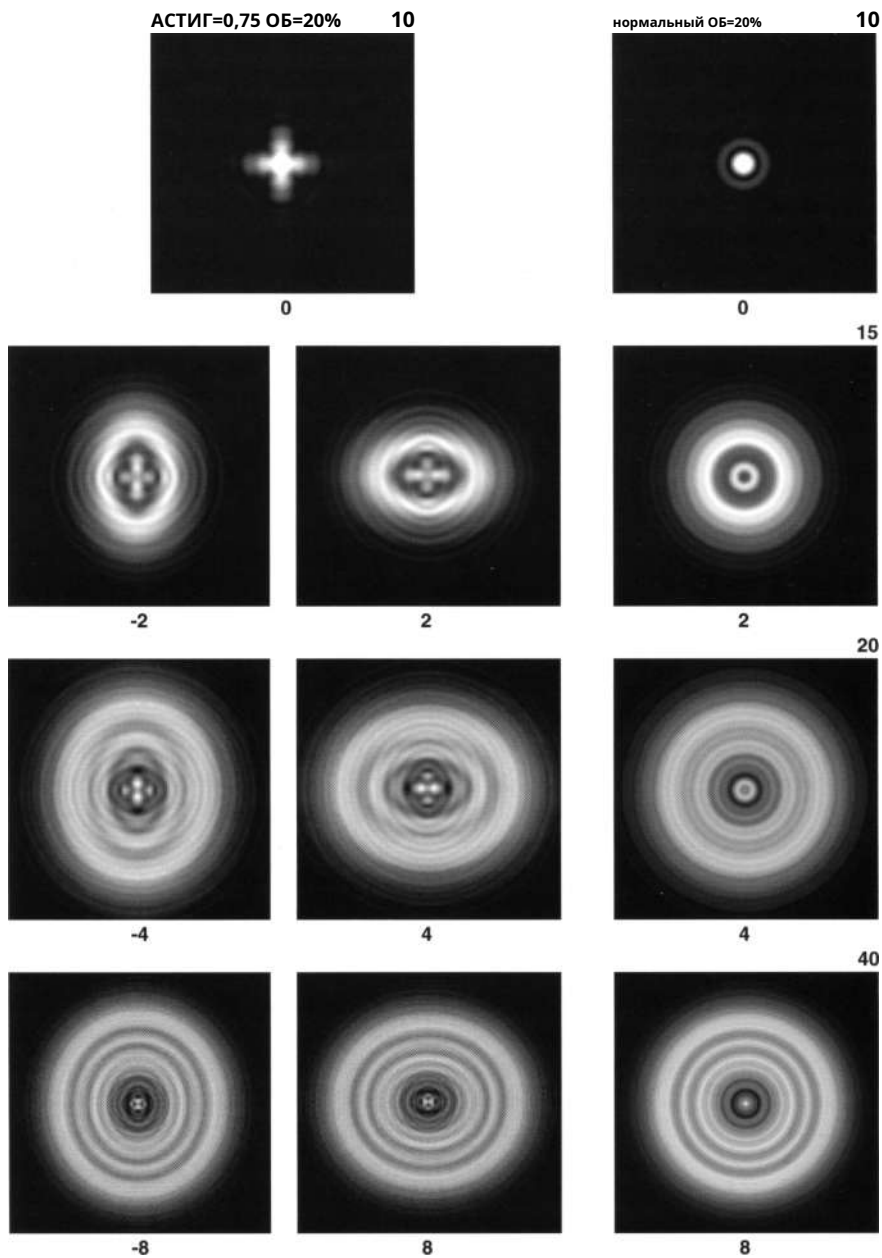


Рис. 14-6. Фокусная серия $\frac{1}{4}$ -волнового астигматизма. Нормальная диафрагма находится в правом столбце. Обструкция составляет 20%. Эллиптичность все еще очевидна при 8-волновой дефокусировке.

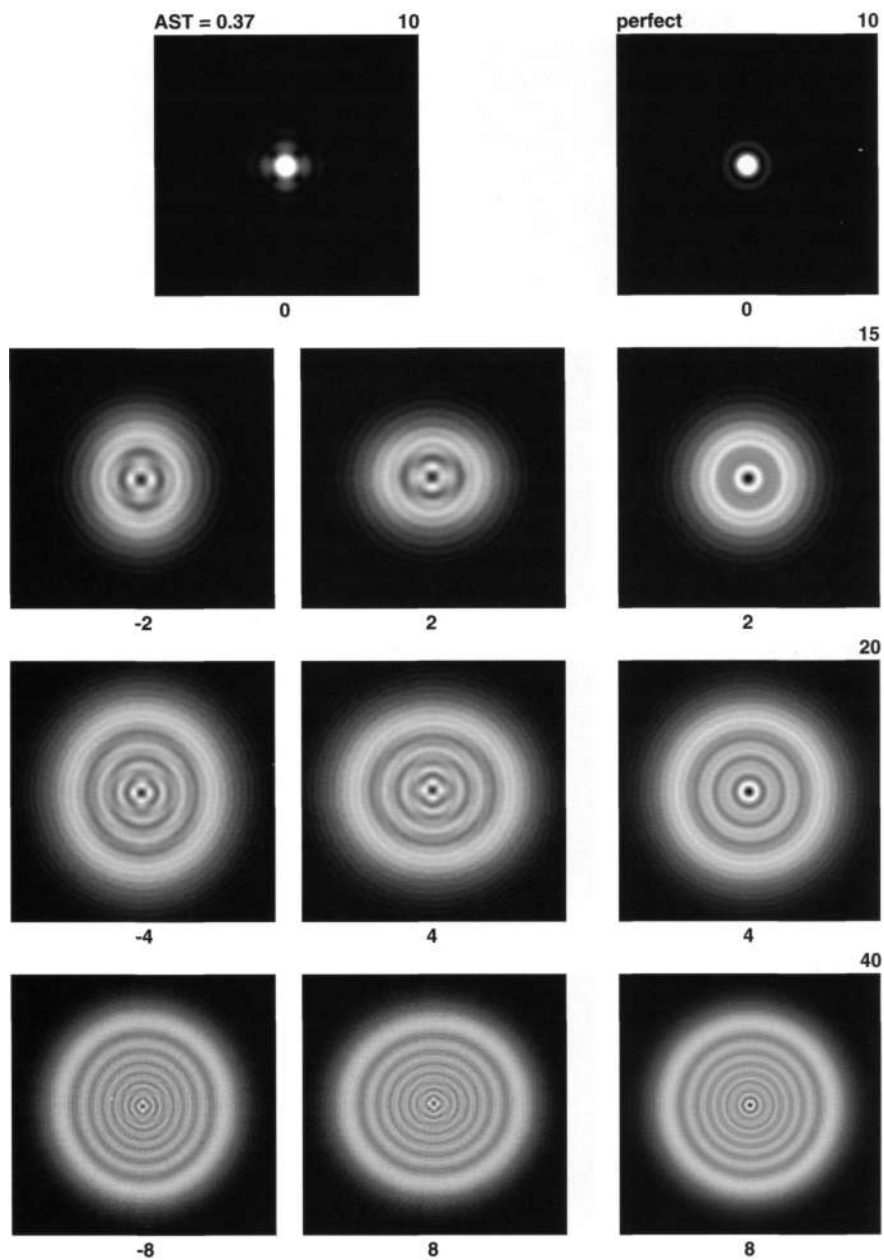


Рис. 14-7. Беспрепятственное отверстие $s/8$ -волновой тотальный астигматизм. В правом столбце изображена идеальная апертура. Растяжение видно при дефокусировке на 4 длинах волн, но его трудно увидеть на 8 длинах волн.

Лучший способ определить, связана ли проблема с вашим глазом, — увеличить увеличение. Вы облегчите видимость астигматизма, если он содержится в телескопе, и уменьшите его силу, если он присутствует в вашем глазу. Немногие глаза настолько плохи, что у них будет сильный астигматизм, если выходной зрачок телескопа установлен ниже 1 мм. Пучок света, выходящий из телескопа, уменьшается в поперечном сечении при большей мощности, и освещенная площадь деформированной роговицы значительно уменьшается. Когда выходной зрачок приближается к точечному отверстию, ваши глаза работают лучше.

В этот момент поверните окуляр. Ось астигматизма должна оставаться фиксированной. Если он следует за вращением, окуляр астигматический.

Следующее, что нужно выяснить, — это угол, под которым астигматизм сжимает или растягивает изображение. В рефракторах или Шмидте-Кассегрене угол очевиден. Что касается ньютоновцев, вы можете проделать тот же трюк, что и в главе о выравнивании. Расфокусировав дальний путь и просунув руку на половину оптического пути, можно определить направление растяжения. С подозрением относитесь к ячейке главного зеркала, если ось астигматизма ориентирована по горизонту или направлению возвышения (то есть по оси гравитации). Подозревайте диагональную ячейку или саму диагональ, если кажется, что астигматизм выровнен относительно тубуса (по оси диагонального наклона).

К сожалению, эти две ситуации иногда возникают вместе, особенно для больших альтазимутальных ньютонов с ровным окуляром. Поэтому мы должны изменить деформацию того или иного зеркала. Первое, что нужно попробовать (особенно если вы проводите проверку искусственного источника с помощью телескопа уровня), — это направить телескоп на звезду, близкую к зениту, и посмотреть, виден ли еще астигматизм. Если главное зеркало опирается на одну крайнюю точку, этот шаг приведет к перераспределению веса зеркала и, следовательно, к его сжатию. Возможно, узор все равно будет плохим, но, по крайней мере, он будет другим. Например, он может трансформироваться в трехсторонний узор. Если изображение не изменилось, слегка встряхните телескоп и повторите попытку.

Если никаких изменений не наблюдается, возможно, проблема в деформации главного зеркала. В случае с зеркалом, приклеенным к ячейке, одна клейкая прокладка может чрезмерно натягивать зеркало, и это натяжение может иметь мало общего с весом зеркала.

Худшая вероятность состоит в том, что зеркало на самом деле имеет амальгамную кривизну стекла. Чтобы определить, касается ли эта проблема вашего телескопа, попробуйте повернуть зеркало на 120°. Перенастройте телескоп и повторите попытку на звезде, близкой к зениту. Ошибка также должна вращаться, если она содержится в зеркале.

Изображение вращается. Спросите себя, хорошо ли работало зеркало в прошлом, и только недавно оно работало плохо. Если это так, то совокупность доказательств, по-видимому, указывает на то, что крепление не удалось или зеркало повредилось или треснуло.

Разберите всю зеркальную ячейку, осмотрите зеркало и осторожно соберите ячейку. Убедитесь, что зеркало надежно удерживается и нигде не защемлено. Если зеркала приклеены к плоской металлической пластине, убедитесь, что вы не затянули эту пластину на месте слишком сильно.

Если после этих корректирующих мер телескоп все еще имеет астигматизм или если он всегда работал плохо, то рассмотрите возможность того, что aberrация либо втерлась в стекло, либо материал подложки зеркала был плохо отожден.

Изображение не вращается. Когда поворот на 120° не затрагивает ось астигматизма, тогда ваше внимание должно быть обращено на диагональ. Опять же, спросите себя, работал ли он хорошо до недавнего времени, а затем внезапно стал плохим. Или изображения всегда были второстепенными, и вы только сейчас проводите исследования с помощью представленных здесь методов звездного тестирования?

Если потеря качества была резкой, то, вероятно, виноват диагональный монтаж. Выньте его и осмотрите. Вы недавно разбирали его для чистки? Вы недавно его перенастроили?

Во многих держателях ньютоновской диагонали за диагональю используется ватная вата. Часто слишком много ваты набивает держатель и вызывает напряжение в зеркале. Используйте достаточно ваты за диагональю, чтобы зафиксировать ее на месте.

Некоторые диагональные держатели имеют конструкцию с разделенным цилиндром. При сборке осторожно расширьте прорезь настолько, чтобы освободить место для диагонального зеркала. Убедитесь, что винт не выступает из основания и не ударяет по зеркалу с обратной стороны, а также убедитесь, что кончик диагонали не касается основания.

Если все эти изменения крепления не помогают, возможно, на поверхности диагонали заполирована сферическая кривизна. Поскольку эта сфера находится под углом 45° , эффект на изображении превращается в астигматизм.

Вы можете проверить эту плохую работу, сняв диагональный держатель и установив его на отдельную опору (идеально подойдет фотографический штатив). Сначала проведите тест прямой звезды на недорогом рефракторе диаметром 50 или 60 мм с использованием искусственного источника. Убедитесь, что изображение имеет круглую форму. Эти рефракторы из универмага часто оптически хороши, и их следует хранить для этой цели, даже если они никогда не используются для наблюдений. Затем снова проведите звездный тест, глядя под углом примерно 45° по диагонали. Если диагональ имеет кривизну, вы увидите, что у рефрактора внезапно развился астигматизм.

Проверить работу диагоналей звезд или прямоугольных призм можно также с помощью этого вспомогательного метода телескопа. Вы можете положиться на любое зеркало, удовлетворяющее такой проверке, поскольку испытание требует одинаковой длины пути по всей поверхности прямоугольного изгиба. Это условие, вероятно, более жесткое

⁴Указание на эту комбинацию может быть неприятным, но в конечном итоге вы добьетесь успеха.

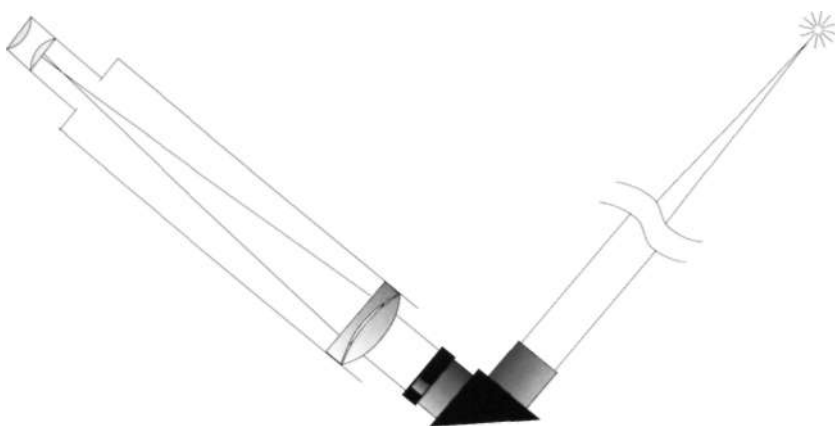


Рис. 14-8. Чувствительный тест диагональных зеркал и звездных диагоналей.

чем фактические требования эксплуатации. При обычном использовании сходящийся световой конус оставляет большую часть поверхности затемненной, но во время теста весь путь освещен одинаково.

14.7 Рефракторы или Шмидта-Кассегрена

За исключением указаний, касающихся диагонали, все еще полезны приведенные выше комментарии и инструкции, касающиеся ньютоновских рефлекторов. Сначала снимите прямоугольную призму или зеркало, если вы его используете. Многие (если не большинство) таких устройств имеют плохое оптическое качество, и проблему можно решить этим простым способом.

Если в рефракторе наблюдается астигматизм, одной из возможных причин является плохое выравнивание. В таких телескопах присутствует достаточно поверхностей, поэтому дизайнеры, если захотят, могут удалить кому из внеосевых изображений. Остался только астигматизм. Попробуйте перенастроить, используя инструкции в Главе 6.

Вторичная обмотка в рефлекторах типа Кассегрена не сильно наклонена, как это было у описанных выше ньютоновцев. Таким образом, сферическая ошибка вторичного диапазона не будет проявляться как астигматизм. Астигматизм может возникнуть из-за деформированной или сильно перенапряженной оптики. Одним из вероятных источников является сам вторичный держатель. Некоторые вторичные зеркала недостаточно изолированы от регулировочной пластины в их основаниях. Искажения на этой пластине могут передаваться зеркалу и проявиться на изображении в виде астигматизма (или того хуже).

Вторичное зеркало Шмидта-Кассегрена регулируется поворотом установочных винтов с помощью шестигранного ключа. Из-за механического преимущества

С помощью такого инструмента вы можете неосознанно создать огромное напряжение (500 фунтов и более) на вторичной ячейке. Вторичное зеркало — единственное зеркало, которое можно регулировать по Шмидту-Кассегрену, поэтому, если вы не можете устранить астигматизм за счет уменьшения усилий во вторичном держателе, вы должны вернуть инструмент производителю для обслуживания.

14.8 Средства правовой защиты

С астигматизмом в стекле ничего не поделаешь, кроме как перенастроить или заменить оптику. Возможно, производитель согласится их вам переконфигурировать, так как оптика либо сошла с завода с астигматизмом, либо доработала его позже из-за неправильно отожженного стекла.

К счастью, астигматизм чаще всего является результатом неправильной сборки зеркальных ячеек и вторичных держателей. Все чаще зеркала удерживаются в ячейках методом приклеивания их к пластине вместо более щадящего метода их свободного крепления с помощью зажимов. Тонкие пластины прогибаются и передают свою деформированную форму оптике под действием силы, прикладываемой клеей прокладкой.

Мы склонны судить обо всем по привычному использованию, и в данном случае мы знаем, что это затягивание болтов, например, в автомобиле. Повседневная вибрация быстро разбила бы автомобиль на куски, если бы винты не были затянуты. Однако телескопы хрупки. Худшая вибрация, с которой они могут столкнуться, — это легкое, нечастое покачивание во время транспортировки. Они не вращаются со скоростью 2000 об/мин, как двигатель внутреннего сгорания, а меняют положение примерно 40 раз за ночь. Это научные инструменты. Крепко, но осторожно затяните винты.

Глава 15

Накопленные оптические проблемы

15.1 Сломать спину верблюду

До сих пор вам было показано, как отдельные aberrации и вариации передачи могут влиять на изображение. Однако более важным является то, как складываются мелкие проблемы. «Шаткая стопка» на рис. 3-1 показывает, сколько ошибок накапливается в наборе фильтров. Даже если каждый фильтр относительно неважен, общая фильтрация может сделать изображение нечетким и нечетким.

Концепция передачи модуляции, изложенная в главе 3, представляет собой единый стандарт, вокруг которого мы могли бы объединиться. Определив оптическое качество как способность системы сохранять контрастность изображения, многие разрозненные оптические проблемы сравнивались на равных.

При обсуждении каждой оптической проблемы предполагалось, что единственной трудностью является одиночная ошибка. Конечно, это ерунда. Подобно волкам, оптические проблемы путешествуют стаями. Выражение «максимально допустимая» использовалось в предыдущих главах для обозначения наихудшего количества единичной ошибки, которое можно вынести. К сожалению, любая дальнейшая потеря качества изображения, независимо от того, была ли она вызвана этой конкретной ошибкой или нет, приводит к тому, что кривая MTF провисает еще ниже.

Для апертуры, страдающей от приемлемого количества нескольких ошибок, давайте посчитаем способность сохранять контраст при наложении каждой последующей оптической проблемы. Это покажет, как ни один отдельный раздел aberrаций, ухудшение оптического качества в виде скопления небольших весов. В конце концов, передаточная функция модуляции разрушается под нагрузкой. По иронии судьбы, мы увидим, что неадекватность качества изображения в нашем примере не вызвана какой-либо одной ошибкой на стекле. Вместо этого плохое изображение обычно является результатом совокупного эффекта нескольких ошибок, включая плохую юстировку телескопа и неизбежное ухудшение атмосферных условий.

Оптические проблемы Таблицы 15-1 последовательно добавляются к идеальной апертуре. Пример ученика не является чем-то необычным, и его можно даже считать лучше обычного. Общие ошибки в первом столбце не складываются напрямую, поэтому среднеквадратичное отклонение отображается по мере его накопления в последнем столбце. Количество заземлений и смещений ячеек кажется чрезмерным, но эти ошибки несопоставимы с критерием Рэлея $\frac{1}{4}$ длины волны. Поскольку они более ограничены по площади, чем ошибки исправления, они должны иметь более высокую общую стоимость, чтобы привести к такому же ухудшению. Все эти ошибки примерно одинаково опасны, и ни одна из них сама по себе не может существенно повредить оптическому качеству.

Таблица 15-1 Совокупные ошибки в
длины волн

	Общий каждого	От пика до долины ошибка	кумулятивный Ошибка среднеквадратичного значения
25% Препятствие	—	—	—
Недокоррекция	0,20	0,20	0,054
Защемление клеток	0,29	0,40	0,077
Несоосность	0,30	0,53	0,094
Турбулентность	0,27	0,70	0,117

Обратите внимание, что на эту апертуру не влияют загнутый край, зоны, астигматизм или шероховатость поверхности. Фактически, это было бы очень хорошо для стендовых испытаний, всего лишь $1/5$ ошибка недокоррекции длины волны. Деформация здесь является важной aberrацией, поэтому мы можем думать об этой апертуре как об одном из ньютоновских тонкозеркальных зеркал, распространенных сегодня. Значение смещения является постоянным. Эти быстрые инструменты трудно поддерживать в коллимированном состоянии, и многие из них обычно используются в состоянии плохой центровки. Aberrация несоосности в $0,3$ длины волны, появляясь отдельно, все равно снижает контраст менее чем на четверть длины волны сферической aberrации. Среднеквадратичное отклонение в последнем столбце показывает, как одни aberrации компенсируют другие. Например, само по себе рассогласование повлияет на среднеквадратичное отклонение чуть менее чем на $0,07$ длины волны.

Сложные кривые MTF показаны на рис. 15-1. Показана только одна кривая для каждой асимметричной aberrации, все для одной и той же ориентации целевых полос. Каждая оптическая ошибка слегка ухудшает изображение, причем некоторые из них кажутся более сильными на одних пространственных частотах, чем другие. Фактически, конкретная смесь, представленная в этом примере, кажется дополняющей. Сферическая aberrация стирает контраст на более низких пространственных частотах (максимум около $0,2$), тогда как смещение действует сильнее на средних пространственных частотах (максимум $0,5$). Прямоугольники представляют собой идеальную апертуру с aberrацией дефокусировки $0,4$ длины волны. Эта единственная aberrация довольно хорошо соответствует огибающей нижнего предела.

Удивительно, но эта диаграмма представляет собой типичное рабочее состояние большого астрономического телескопа. Выбор величины aberrации в

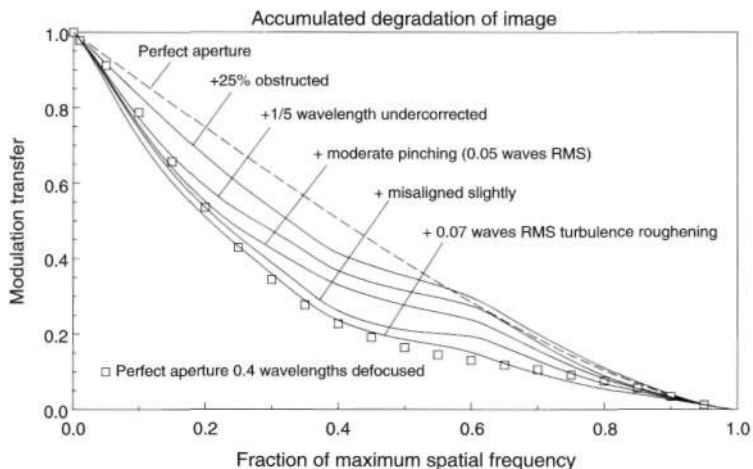


Рис. 15-1. Фильтрация реалистичной апертуры. Кривые показывают фильтрацию как aberrации последовательно добавляются.

этот пример особенно щедр на турбулентность воздуха. Согласно материалам, представленным ранее, выбранная степень турбулентности будет оцениваться от высокой 8 до низкой 9 по шкале «видимости» Пикеринга.

Звездные испытания показаны на рис. 15-2, поскольку эти оптические проблемы добавлялись одна за другой. Каждая сложность ненамного хуже, чем в кадре выше, но нижний ряд значительно хуже первого.

Питер Чераволо изготовил хорошо откалиброванный набор 6-дюймовых (150 мм) зеркал с диафрагмой $f/8$, имеющий погрешность коррекции от пика до минимума $1, 1/2, 1/4$ и $1/10$ длины волны. Когда он установил их рядом и попросил наблюдателей оценить их, он заметил, что людям без труда удалось назвать 1 и $1/2$ -ошибки коррекции длины волны от лучшей пары, но с трудом отличал $1/4$ -волновое зеркало и почти идеальное (Чераволо и другие.1992).

На основе расчетного примера, приведенного выше, мы можем размышлять о причинах этой неспособности отличить почти идеальное зеркало от едва приемлемого. Телескопы Чераволо, вероятно, меньше беспокоились из-за смещения, заземления оптики или препятствий, чем из-за турбулентности. Теренс Дикинсон оценил зрение на 7 из 10 за один такой сеанс. Когда мы обратимся к материалу о турбулентности в главе 7, мы можем оценить, что «видение» 7 вызывает aberrацию где-то около $0,10$ длин волн RMS. Напомним, что $1/4$ длина волны ошибки коррекции составляет около $0,075$ длины волны RMS. Отсутствие видимой разницы в характеристиках между лучшими зеркалами могло произойти из-за того, что ухудшение контрастности было обусловлено прежде всего зрением. Только когда сферическая aberrация стала достаточно большой, чтобы ее можно было сравнить с неровностями, вызванными турбулентностью, разница стало легко заметить.

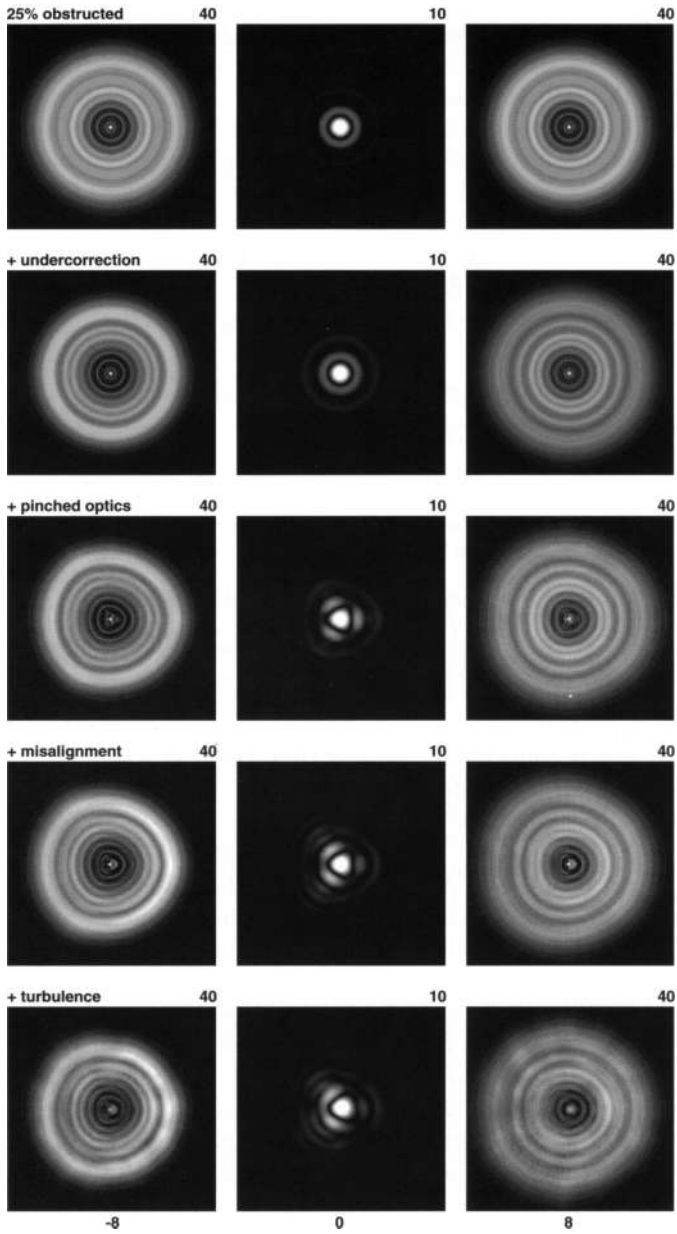


Рис. 15-2. Изображения aberrаций на рис. 15-1 показаны по мере добавления каждой дополнительной трудности.

На рисунке 15-3 показаны конкретные примеры этих ошибок коррекции с добавленной аберрацией турбулентности (при условии, что другие аберрации не вносят вклада). Для ньютоновского объектива с фокусным расстоянием 150 мм $f/8$ приемлемо препятствие в 20%.

Поместите эту фигуру на некотором расстоянии от глаз и постарайтесь уловить разницу между $1/10$ -длина волны и $1/4$ -волновые кадры изображений. Имейте в виду, что характер турбулентности постоянно меняется. Кривые передачи модуляции показаны на рис. 15-4. Турбулентности достаточно, чтобы испортить великолепную оптику $1/10$ -волновое зеркало и оно доминирует над ошибкой коррекции $1/4$ -зеркало с длиной волны. Только зеркала более низкого качества настолько плохи, что сферическая аберрация подавляет турбулентность.

15.2 Крепление телескопа

В отсутствие достоверной информации люди склонны концентрироваться на одной из предполагаемых оптических проблем телескопа и винить ее во всем. Например, энтузиасты зеркального изготовления делают все возможное, чтобы создать сверхточные оптические поверхности. Они знают оптическое производство, поэтому видят все ошибки в неправильной форме поверхностей. Люди, собирающие свои телескопы из готовых деталей, занимаются исключительно проектированием телескопов. Некоторые рьяно уменьшают размеры вторичной непроходимости. Другие пытаются уменьшить препятствие или, по крайней мере, замаскировать его, сгибая лопасти. Некоторые становятся специалистами в загадочных трюках по дезориентации или пытаются запечатать трубки своих отражателей оптическими окнами. Многие подозревают, что их телескоп недостаточно коллимирован, и основное внимание уделяют юстировке.

Урок рис. 15-1 состоит в том, что ни одна оптическая проблема не является абсолютно важной, и ни одну проблему нельзя полностью игнорировать. Каждая трудность заслуживает соответствующего ответа, причем важным словом является *соответствующий*. Каждая предполагаемая ошибка заслуживает определенного внимания, но ни одна ошибка не должна подчеркиваться за счет исключения других. Более того, ни одной проблеме не следует придавать столько значения, чтобы ее можно было вылечить *ущерб* хорошие эксплуатационные характеристики телескопа.

Кроме того, мы должны подумать о типе наблюдения, а также об ошибках. Существуют специальные ситуации наблюдений, когда небольшая паутиная дифракция, микрорябь или несколько пылинок имеют значение. В остальных случаях они вообще не имеют большого значения. Имейте дело только с реальными угрозами.

Если вы замаскируете зеркало, чтобы уменьшить загнутый край, не забудьте также тщательно заслонить инструмент. В конце концов, изображение не заботится об источнике паразитного света. Одним из шагов, которым чаще всего пренебрегают, является тщательное закрытие последней трубки фокусера либо с помощью серии неглубоких колец, либо с помощью нарезания резьбы. (Один умный производитель решает эту проблему, устанавливая спиральный

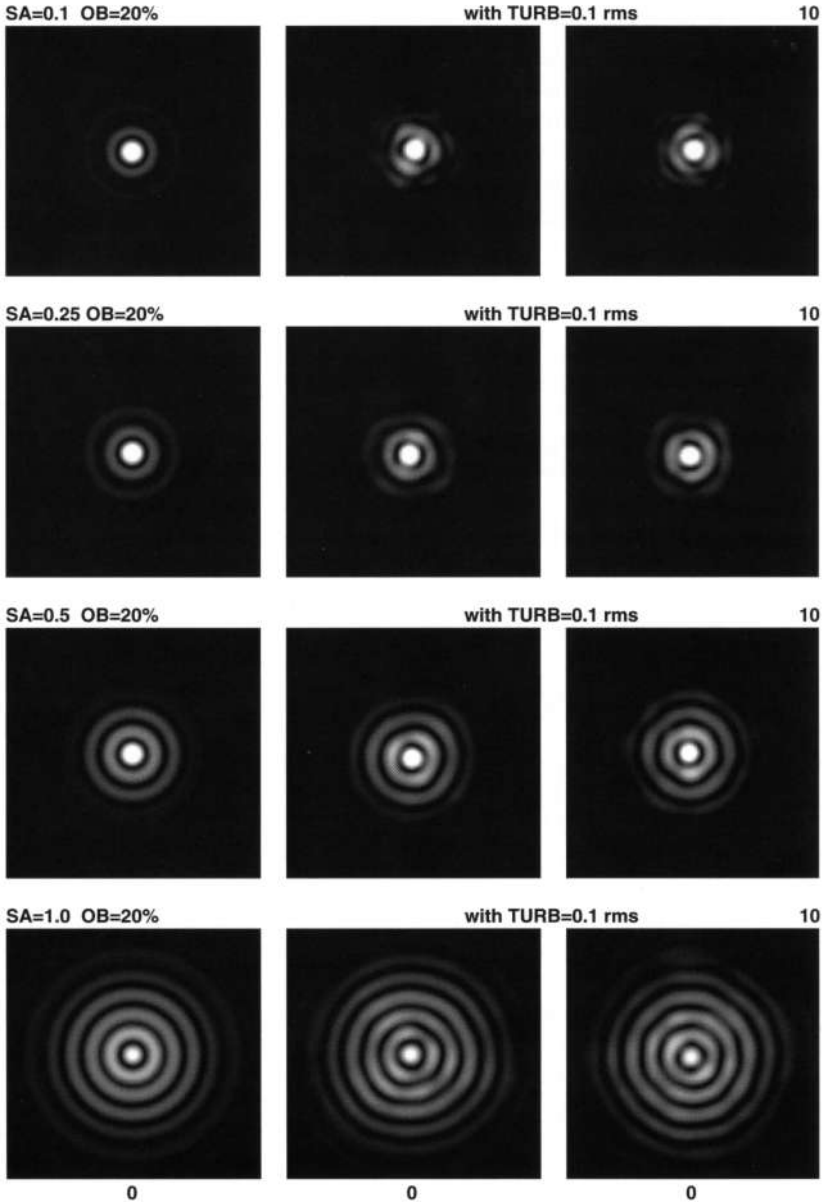


Рис. 15-3. Модель четырех зеркал Чераволо, если они используются при наличии погрешностей атмосферной турбулентности, составляющих 0,1 длины волны RMS. Препятствие было произвольно выбрано равным 20%. Аберрации, вызванные только поверхностными ошибками, указаны в левом столбце. Остальные столбцы содержат примеры фрактально полученных турбулентных волновых фронтов, добавленных к ошибкам коррекции.

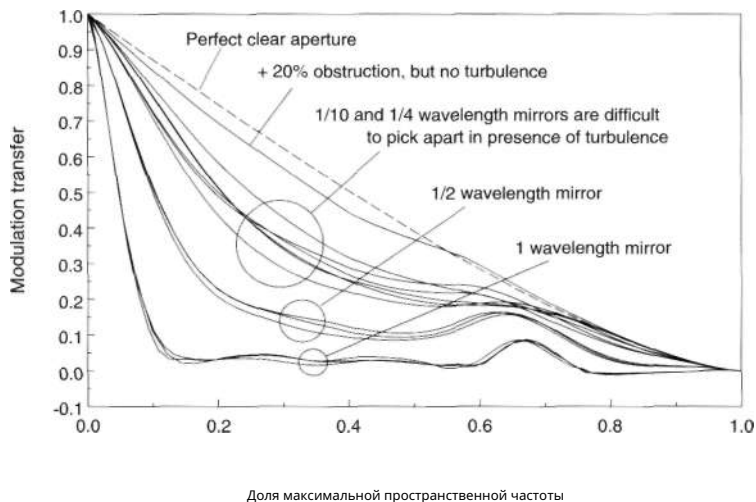


Рис. 15-4. Кривые MTF сферической aberrации в сочетании с шероховатостью, вызванной турбулентностью, со среднеквадратичным значением длины волны 0,1.

пружина внутри трубки.)

Обратите внимание на все, что видно изнутри фокусера. Может ли яркая звезда, вышедшая из поля зрения, испортить изображение внутренними отражениями? Достаточно ли длинна вашей трубки Ньютона, чтобы далекие уличные фонари не добавляли свечения изображению?

Если каждое из ухудшений, показанных на рис. 15-1, сократить вдвое, вы сможете получить значительно улучшенное изображение. Конечно, выравнивание возглавляет список нарушений, но если телескоп выровнен, считайте, что работа выполнена лишь частично. Вторичный размер важен, но некоторые из небольших размеров, предложенных в литературе (от 10% до 15% апертуры), могут быть слишком требовательными. Уменьшив вторичную обструкцию до 20% или ниже, вы значительно поднялись по кривой убывающей отдачи. Важно то, что вы решили каждую проблему по очереди. Если каждое ухудшение MTF слегка усилить, чистый выигрыш может быть значительным.

Решение проблемы более низкого MTF, которое может быть неочевидным для некоторых читателей (а для других может показаться обманом), состоит в том, чтобы приобрести телескоп большего размера. Напомним, что максимальная пространственная частота (в единицах циклов/угла) равна D/λ . Следовательно, если на рис. 15-1 показан отклик рефлектора диаметром 400 мм (16 дюймов), мы увидим, что он обеспечивает контраст примерно такой же, как и рефлектор *идеальный* свободное отверстие от одной трети до половины его размера. Это означает, что он ведет себя примерно так же, как лучший 6-дюймовый беспрепятственный телескоп. Фактически, 16-дюймовый рефлектор

¹различия, вызванные масштаб атмосферной турбулентности, изменениями в характеристиках окуляра при более низких фокусных отношениях и более яркими изображениями, означают, что производительность не будет точно воспроизведена.

обладающий только теми aberrациями, которые изображены на рис. 15-1, можно было бы считать отличным телескопом *для своего размера*. Следовательно, если нас беспокоят характеристики маленького телескопа, мы можем смириться с аналогичным ухудшением в большей апертуре и все равно выйти вперед (Zmek 1993). Использование такого каткового метода для исправления ошибок может быть непростым, но эффективным. Все, что приводит к улучшению имиджа, является законным.

Многие проблемы, не имеющие ничего общего с конструкцией или оптическим качеством, влияют на работу телескопа. Например, спросите себя, правильно ли вы справились с очевидными вещами, такими как приобретение плавно работающего фокусера, прежде чем задумываться о неясных вещах, таких как минимизация препятствий.

Некоторые инструменты настолько трясутся, что одно прикосновение к ручке приводит к тому, что изображение начинает дико кружиться. Такие телескопы невозможно сфокусировать, используя обычную интуитивную координацию рук и глаз. Другие телескопы достаточно прочны, но их фокусеры настолько затянuty и их трудно поворачивать, что наблюдателю приходится с ними бороться. Некоторые фокусеры смазываются особенно густой смазкой, которая затвердевает на морозе.

Никакое оптическое совершенство не сможет улучшить телескоп, который невозможно сфокусировать. Независимо от того, насколько вы уменьшили препятствие, тщательно выровняли оптику или отклонили трубку, изображение плохо сфокусированного инструмента все равно будет некачественным. Рисунок 15-1 демонстрирует этот принцип в обходной манере. Маленькие прямоугольники были призваны показать, как простая расфокусировка имитирует совокупную кривую, но подразумеваемый смысл заключается в том, что расфокусировка *одинаково* недостаточно, чтобы уничтожить изображение.

Телескопы — это зрелая технология. Серьезные модификации, вероятно, являются ошибками. Тем не менее, тщательная настройка здесь и там, если она не чрезмерна, может гарантировать, что ваш телескоп будет работать настолько хорошо, насколько это возможно. Вероятно, это сработает даже лучше, чем вы могли себе представить до того, как начали.

15.3 Ошибки на стекле

Ошибки, отполированные до стекла, навсегда останутся. Такие вещи, как сферическая aberrация, загнутый край или притертый астигматизм, невозможно отрегулировать, а пользователь не может просто ждать, как в случае с атмосферными или охлаждающими эффектами. Телескоп никогда не сможет работать должным образом.

Ошибки стекла требуют трезвого размышления. Предположим, вы недорого приобрели быстрый альтазимутальный рефлектор с тонким зеркалом, «легкое ведро», основной целью которого является небольшое или среднее увеличение. Вы не можете ожидать четких дисков Эйри и четко очерченных дифракционных колец. Мало кто захочет платить за время оптики, необходимое для достижения такого совершенства в большом приборе, и немногие, живущие под обычным небом, часто могут использовать такое совершенство. Оптик не может уделить оптической поверхности много внимания, не взимая за это огромную сумму денег.

услуга. Время, необходимое для формирования зеркал до дифракционного предела, резко увеличивается с увеличением апертуры или низкого фокусного расстояния. У больших и быстрых зеркал и того, и другого в избытке. Этот большой телескоп не даст четких изображений планет, но, по крайней мере, он должен хорошо работать с объектами, которые он должен был наблюдать.

Однако если вы приобрели телескоп общего назначения с умеренным фокусным соотношением и умеренной апертурой, вы имеете право рассчитывать на приемлемые характеристики всякий раз, когда зрение позволяет это. Прежде чем жаловаться производителю, еще раз протестируйте телескоп в других условиях. Убедитесь, что телескоп выровнен и ошибка не связана с окуляром. Определите, какой оптический компонент вызвал ошибку. Если возможно, попытайтесь увидеть звездный тест на хорошем инструменте, прежде чем судить о телескопе как о плохом. Либо остановите мешающий инструмент с помощью внеосевой маски, либо проведите звездный тест на маленьком или медленном телескопе, который, скорее всего, даст почти идеальный результат. Не стоит полностью доверять оценкам сферических аберраций, полученным в быстро меняющихся температурных условиях.

Если по итогам всех этих проверок вы все еще убеждены, что телескоп имеет неприемлемую оптику, обратитесь к производителю. Не тратьте время на обсуждение своих оптических подозрений, если вы не совсем уверены. Производители телескопов могут использовать запасы непонятного вам жаргона. Если вы не очень хорошо осведомлены, такая терминология вскоре заставит вас задыхаться, как выброшенная на берег рыба. В своей жалобе просто укажите, что телескоп плохой. Четко и внимательно объясните, что прибор не фокусируется в узком месте, и скажите, что товар вас не устраивает.

Гнев в общении с создателями бесполезен и может противоречить вашим интересам. Всегда сопровождайте телефонные звонки письменной перепиской. Лишь немногие производители сознательно предлагают телескопы плохого качества. Большинство будет работать с вами до тех пор, пока вы не получите удовлетворение.

15.4 Тестирование других телескопов

Как только вы познакомитесь со звездным тестированием, ничто не помешает вам оценить каждый встреченный инструмент. Такая практика поможет вам развить способность замечать различные отклонения. Рано или поздно внимательный звездный тестер увидит все типы оптических проблем, обсуждаемых в этой книге, а также некоторые, которые не обсуждаются. Вас поощряют в этих усилиях по расширению вашего опыта.

Однако оставьте результаты теста при себе. Если оставить в стороне соображения вежливости, такие мнения могут быть ошибочными. Вы вообще ничего не знаете об истории инструмента. Вы не знаете, прохладно это или тепло. У вас не было возможности предварительно выровнять его, поэтому вам нужно мысленно вычестить из шаблона значительную ошибку выравнивания. Кроме того, одноразовые тесты

носят анекдотический характер и не позволяют провести последующее тестирование. Помните, вам сказали снова и снова проверять свой собственный телескоп. С чего вы взяли, что можете оценить чужое, взглянув в окуляр?

Если вас спросят ваше мнение, дайте его вместе с комментарием о значительных неопределенностях. Не представляйте результат как провозглашение небес. Тщательно объясните, как вы разработали оценку. Если другие не знают звездного теста, научите их ему. В конце концов, я надеюсь, вы уже поняли, что звездные испытания не так уж и загадочны.

15.5 Когда все идет хорошо

Я не хочу оставлять вас с фаталистической интерпретацией звездного испытания. Однажды научившись оценивать телескопы, люди склонны относиться к своим инструментам чрезмерно критично. Ничто их не радует. Кажется, что иллюзия реальности исчезла, а вместе с ней и чудо.

Вот пример потери иллюзий: много лет назад мне указали на универсальный недостаток старых кинофильмов. Незадолго до конца ролика дважды появляются маркеры в виде пробитых отверстий в помощь киномеханикам. Если пробить негатив, отверстия превратятся в темные пятна. Поскольку большинство фильмов сжимаются по горизонтали, эти отметки выглядят как сплюснутые овалы: один примерно через 10 секунд, а другой непосредственно перед сменой катушки. Второй проектор всегда запускается в тот момент, когда кадр темный или резко меняет яркость.

Я никогда раньше не видел этого крошечного изъяна и всегда замечаю его сейчас. Мне почти хотелось бы, чтобы мне никогда об этом не говорили. Это место, где проглядывают кости технологии, неизменно вырывает меня из успокаивающей иллюзии фильма и напоминает мне, что я просто смотрю фильм.

Точно так же, как только оптические явления станут вам знакомы, вы увидите их повсюду. Владельцы очков не смогут ходить ночью под моросящим дождем, не заметив интерференционных полос в преломленном блеске света на линзах. Глядя вверх на чистое голубое небо, вы иногда заметите в глазах мушки, окруженные крошечными дифракционными кольцами. Вы увидите зловещие следы хроматической аберрации в каждой радуге.

Я надеюсь, что вы не станете неестественно чувствительны к недостаткам вашего телескопа. Я знаю людей, у которых есть телескопы с отвратительной оптикой, но они постоянно и часто проводят продуктивные наблюдения. Я знал других владельцев, которые жаловались на телескопы, которые мало далеки от совершенства. Они почти никогда не проводили время под звездами, но постоянно настраивали и модифицировали свои лишенные света инструменты. Кажется, что отношение пользователя телескопа является последним фильтром в шаткой стопке и часто становится наихудшей формой деградации. Звездный тест обеспечивает более реалистичное изображение. Оно не предназначено для того, чтобы превратить счастливого наблюдателя в

в грустный или испортить великолепную иллюзию, которую создает телескоп.

Астрономические телескопы могут создавать восхитительные изображения, и я сослужил бы плохую службу читателям, если бы оставил у них чувство разочарования и испортил волшебство звездного света. Я хочу описать то, что видел собственными глазами, когда все шло правильно — когда большая часть фильтрации отпала и оптика работала беспрепятственно.

Это был один из тех редких случаев, когда температура оставалась практически постоянной весь день. Однажды вечером моя группа наблюдателей установила 16-дюймовый ньютоновский телескоп с диафрагмой $f/5,6$. У него было зеркало толщиной 3 дюйма, у которого часто были проблемы с охлаждением, но весь день оно было близко к температуре окружающей среды. Вечер был на удивление спокойным. Это была одна из тех редких ночей, когда, казалось, не было верхнего предела полезному увеличению. Мы выровняли инструмент и повернули к Юпитеру, затем под углом около 45° .

Тень луны пересекала диск Юпитера. Оно выделялось четко и отчетливо на фоне сияния планеты. Серый диск самой Луны был ясно виден, когда он проходил мимо планеты. На поверхности было видно столько завитков и зубцов, что ни часы зарисовок, ни мое ограниченное мастерство не смогли бы их уловить. Я не столько смотрел в телескоп, сколько проецировался за его пределы. Я прошел через окуляр.

Подобный опыт у меня случался редко, но достаточно часто, чтобы все это того стоило. Однажды я видел деление Кассини, видимое на всем освещенном круге колец Сатурна. Кольцо из крепа было легко видно; в темноте оно выглядело неясным. В другой раз, при увеличении 350, я увидел шаровое скопление M15, четко различимое по всему ядру, где каждая звезда видна как крошечная искорка света.

Интересно, сколько из миллиардов людей, когда-либо ходивших по земле, видели эти вещи. Я чувствую себя счастливым и горжусь тем, что сделал это сам.

В эти особенные ночи я не рассматривал телескоп как фильтр. Я верил, что изображение было реальным. И в этом смысл всего этого труда. Мы учимся оценивать величину оптических ошибок, чтобы помочь прибору выполнить свое предназначение. Мы делаем это в те краткие моменты, когда можем забыть, что смотрим в телескоп, — когда мы можем почувствовать тихое величие неба.

Приложение

Другие тесты

1930-е годы были годами бума любительского производства телескопов в Соединенных Штатах, в первую очередь благодаря усилиям по популяризации таких людей, как Рассел Портер и Альберт Ингаллс. По оценкам, за годы до Второй мировой войны было запущено до 250 000 телескопов. В каком-то смысле это был единственный вариант. Бушевала Великая депрессия, и были открыты оптические мастерские, специализирующиеся на изготовлении дорогих рефракторов или заключении контрактов на профессиональные инструменты. Если в те времена вам нужен был телескоп по разумной цене, вам приходилось делать его самостоятельно.

Вскоре несколько любителей стали «профессионалами», создавая инструменты такого типа, которые другие любители хотели и могли себе позволить купить. Постепенно, по мере увеличения числа таких производителей, характер любительской астрономии менялся. Шлифование стекла больше не было обрядом посвящения в астрономический мир. Появление коммерческих катадиоптрических телескопов Шмидта-Кассегрена примерно в 1970 году завершило трансформацию. Телескопы теперь являются предметами потребления.

В прежние времена почти каждый имел некоторое представление (если не опыт) о критическом тесте и общее представление о концепциях, лежащих в основе тестирования во время производства. Лишь немногие современные астрономы-любители принимали непосредственное участие в создании своих собственных инструментов. Любители слышали о заводских тестах, но видели тестировщиков только на выставке. Большинство производителей телескопов-любителей сегодня занимаются механическим проектированием и конструкцией своих телескопов, а не оптикой.

Таким образом, большая часть приведенного ниже материала будет для многих людей новой. Может показаться, что я кратко и кратко рассказываю о различных тестах оптических магазинов, представленных здесь. Эта резкость не входит в мои намерения. Приведенные ниже тесты могут быть интересными и дать новое представление об оптическом качестве. Каждый из них настолько отличается от остальных, что предлагает свежий взгляд на аберрации волнового фронта. Большая часть моей критики касается не самих тестов,

но их неправильное использование.

Однако я хочу отметить, что эти тесты не рекомендуются, если все, что вы хотите знать, это хороший ли ваш телескоп. Все они интересны, а некоторые феноменально чувствительны, но это не самый прямой путь к пониманию того, сможет ли ваш телескоп работать хорошо. Звездное испытание – именно этот путь.

Для полноты картины эти тесты описаны ниже вместе с кратким списком трудностей для новичков или непредвиденных расходов. Причины nereкомендования их разнообразны, но большинство из них сводятся к следующему:

1. Большинство этих тестов полезны при оптических испытаниях. *изготовлении отдельных оптических деталей, а не оценке готовых телескопов.*
2. Многие из этих тестов предполагают покупку или изготовление дополнительного оборудования, некоторые из которых могут быть очень дорогими.
3. Часто они требуют сложной обработки данных или сложных теоретических знаний.
4. Большинство из них ориентированы на один тип поверхности и требуют нескольких испытаний или дополнительной оптики, если их необходимо применить ко всему прибору.

Читателям предлагается узнать больше об одном или нескольких из следующих методов тестирования. Каждый из них мог бы заполнить (и, возможно, заслуживает) собственную книгу, так же, как эта посвящена звездному испытанию. Вы можете потратить всю жизнь, выясняя подробности, касающиеся любого из них.

А.1 Тест Фуко

Жан Бернар Леон Фуко был ученым-универсалом. Он наиболее известен тем, что продемонстрировал вращение Земли путем прецессии оси маятника и измерил скорость света. Он также сделал первую дагерротипную фотографию солнечных пятен, положив начало астрофотографии. Фуко сделал первое зеркало телескопа «металл на стекле». Наконец, он изобрел чувствительный тест оптики в центре ее кривизны.

Представьте себе отражающую сферу диаметром 6 метров. Очевидно, что свет, исходящий из точки в центре этой сферы и расходящийся наружу, попадет на каждую часть сферы одновременно, а затем отразится и сойдется, чтобы быть идеально отображенным как точка на источнике, который первоначально излучал его.

Хотя это было бы красиво, но отражающая сфера диаметром 6 метров малопримгодна. Если бы хотя бы одна крошечная часть этой сферы

были посеребрены, отражающая часть представляла бы собой слабо вогнутую область. Затем неотражающие части можно было бы обрезать. Допустим, остаток — это зеркало диаметром 10 дюймов (250 мм) $f/6$ (1500 мм), которое мы хотим протестировать.

Прежде чем можно будет сказать, что проводится настоящее испытание, необходимо разработать какой-то метод определения оптического качества. Первая проблема заключается в том, что источник света в центре сферы, например, освещенная точечная дыра, отображается поверх самого себя. Изображенный свет недоступен оптику. Фуко решил эту проблему, слегка сместив источник. Точка изображения в этом случае находится поперек центра кривизны на расстоянии, примерно равном смещению. Пока расстояние между точечным отверстием и изображением остается небольшим, астигматизм влияет на тест лишь незначительно.

Вторая проблема — придумать метод зондирования точки изображения на предмет неправильной фокусировки. Можно было рассмотреть его в окуляр и получить, таким образом, вариант звездного теста, но этот метод был известен уже во времена Фуко. Процедура проверки точечных отверстий не всегда позволяет получить цифры, полезные для планирования следующего этапа полировки. Проверка с помощью окуляра также требует чрезвычайно маленького источника; в приведенном выше 250-мм зеркале отверстие должно быть меньше 16 мкм (0,0006 дюйма) в поперечнике. Это ограничение было особенно строгим во времена Фуко, потому что портативные источники света были основаны на пламени и, следовательно, были довольно слабыми, рассеянными и их было трудно сфокусировать на точечном отверстии.

Умногое решение Фуко заключалось в том, чтобы ввести перекрывающую кромку луча рядом с точкой изображения. Этот тест носит популярное название «тест на острие ножа Фуко», хотя метод не зависит от остроты лезвия. Нож медленно вводится вблизи фокуса. В простейшей конфигурации глаз тестера располагается близко к ножу и смотрит мимо него в зеркало. Если нож находится между зеркалом и точкой изображения, темная тень ножа кажется темной с той же стороны зеркала, что и нож. Вне фокуса кажется, что тьма пересекает зеркало с обратной стороны.

Совсем не обязательно использовать источник-обскуру. Короткая прорезь может служить одинаково хорошо, пока нож расположен параллельно ее изображению. Таким образом, освещенность можно увеличить в сотни раз.

Нож перемещают по направлению к зеркалу и от него до тех пор, пока не будет найден фокус. Если точка фокусировки нанесена точно, тень на зеркале не будет отражать направление движения ножа. Положение ножа, при котором обнаружено ненаправленное поведение, доказывает, что зеркало должно быть частью сферы. Он тускнеет равномерно, а затем полностью затемняется. Тест Фуко для сферического минора — это настоящий нулевой тест: отражение гаснет. См. рис. Ал.

Если на зеркале существуют какие-либо высокие или низкие места, то не может быть обнаружено разделения между зеркалом и ножом, при котором зеркало затемняется равномерно. Внешне тест напоминает тени, отбрасываемые лампой, светящейся сбоку от зеркала.

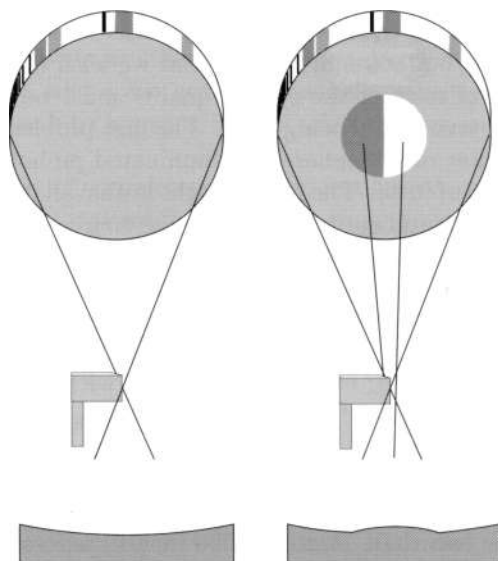


Рис. А-1. Две установки для теста Фуко: одна идеальна, а другая показывает небольшой холм в профиле зеркала (абберация преувеличена).

напротив ножа. Холм действует как выступ на, казалось бы, плоской поверхности. Одна сторона очень яркая, а другая очень темная. Возвышенная область показана на нейтрально-серой плоскости. Конечно, эту концепцию бокового освещения следует рассматривать как удобное заблуждение. «Холмы» не отбрасывают теней, а весь вид дисплея можно изменить, просто перемещая нож вдоль оси зеркала. На рисунке вы можете тянуть нож назад до тех пор, пока центральный выступ не станет равномерно серым и не окажется в огромной чашеобразной впадине.

Гениальность Фуко заключалась в том, что он не успокоился, когда нашел этот чувствительный тест для сферических зеркал. Он модифицировал свой новый тест, чтобы изобразить параболюиды, используемые в качестве основного оптического элемента ньютоновских телескопов. Проблема с тестированием параболюидов в их «центре кривизны» заключается в том, что парабола не является кругом и на ее поверхности не определен единый центр кривизны. Вы можете прищуриться и убедить себя, что неглубокая тарелка — это сфера первого порядка, но идеальный параболюид не должен быть нулевым.

Однако поведение световых лучей вблизи центра кривизны параболюида можно легко рассчитать. Они сходятся вдоль роговой каустики, определяемой перекорректированной поверхностью. Каустика — это область, в которой лучевая оптика строго нарушается, но для целей чисто геометрического теста Фуко делают вид, что это не так.

Жан Тексеро нарисовал очень информативную диаграмму этого поведения, которая воспроизведена на рис. А-2 (Тексеро, 1984). Каустика лучше всего видна на диаграмме лучей внизу слева, где часть ее заблокирована ножом. Внешний вид теста Фуко при различных положениях ножа изображен справа пунктирными рисунками. Длина этой области пересечения лучей (которая выглядит как черная полоса на кончике ножа) связана с коррекцией зеркала. Для сферы в центре кривизны длина, конечно, равна нулю. Для параболоида это

$$\frac{D_p}{4r} \quad (\text{A.1})$$

Лос-Анджелес

где r — приблизительный радиус кривизны зеркала и D_p это его диаметр. *Лос-Анджелес* означает *продольная абберрация*, растяжение черной полосы на диаграмме. Для гиперболоида *Лос-Анджелес* — большее число, а для вытянутого сфероида — меньшее.

Если оптический работник измеряет сдвиг между ситуациями А и С и продолжает изменять форму зеркала до тех пор, пока этот сдвиг не станет равным или немного меньше $D_p/4R$, тогда параболоид будет близко аппроксимирован. До Фуко изготовление зеркал было областью высокого искусства, а не небольшим количеством догадок. Зеркальное тестирование на простейшем уровне сводилось к обнаружению внешнего вида центральной зоны (А) и краевой зоны (С) и измерению расстояния между ними. (См. Суитер, 1988.)

Примеры таких ситуаций, сфотографированные на реальном зеркале, показаны на рис. А-3. Вы также можете увидеть крошечную центральную зону кнопок. Благодаря расположению в тени диагонали он не повредит изображению.

Контуры, которые, по-видимому, показаны воображаемым боковым фонарем, имеют видимую амплитуду примерно от 3 до 6 мм для параболоида 150 мм $f/8$. Поскольку этот параболоид отклоняется от сферы примерно на $1/8$ длины волны, мы можем вычислить синтетическое увеличение ошибок, которое составляет около 4 мм/0,00007 мм или 60 000.

Эта разработка в сочетании с технологией нанесения металлических пленок на стекло подготовила почву для создания огромных отражателей 20-го века. Фуко — крестный отец массивных инструментов, которые мы используем сегодня.

Тест Фуко на острие ножа чувствителен и проверен, но его не рекомендуется использовать в качестве окончательной оценки по нескольким причинам:

1. Тест требует некоторой практики. Необходимо обладать навыками постановки, согласования и интерпретации критерия Фуко.
2. Это не позволяет проводить испытания выпуклых элементов составных оптических систем без дорогостоящего дополнительного оборудования. За исключением теста автоколлимации на огромной оптической плоскости, необходимо разобрать телескоп и протестировать отдельные детали, некоторые из которых может быть нелегко снять.

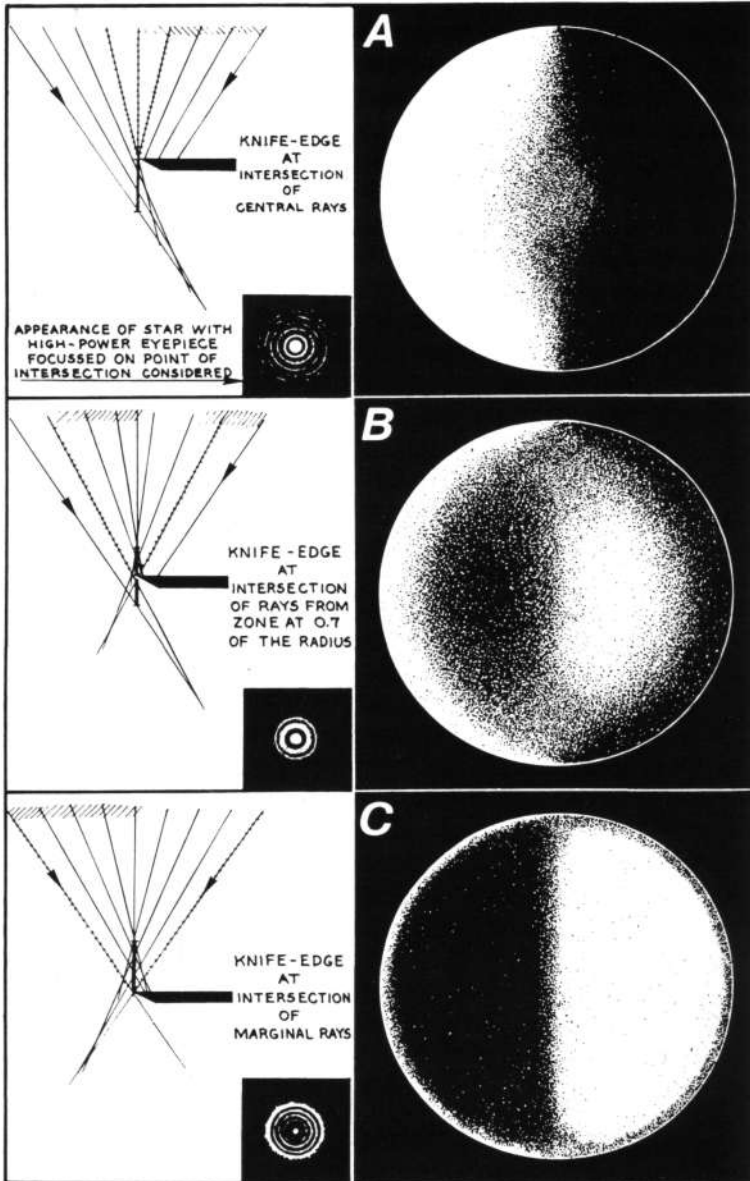


Рис. А-2. Рисунок трех положений ножа и полученный вид параболического зеркала в тесте Фуко. Отжак сделать телескоп Автор: Жан Тексеро, авторские права © Willmann-Bell, Inc., 1984.

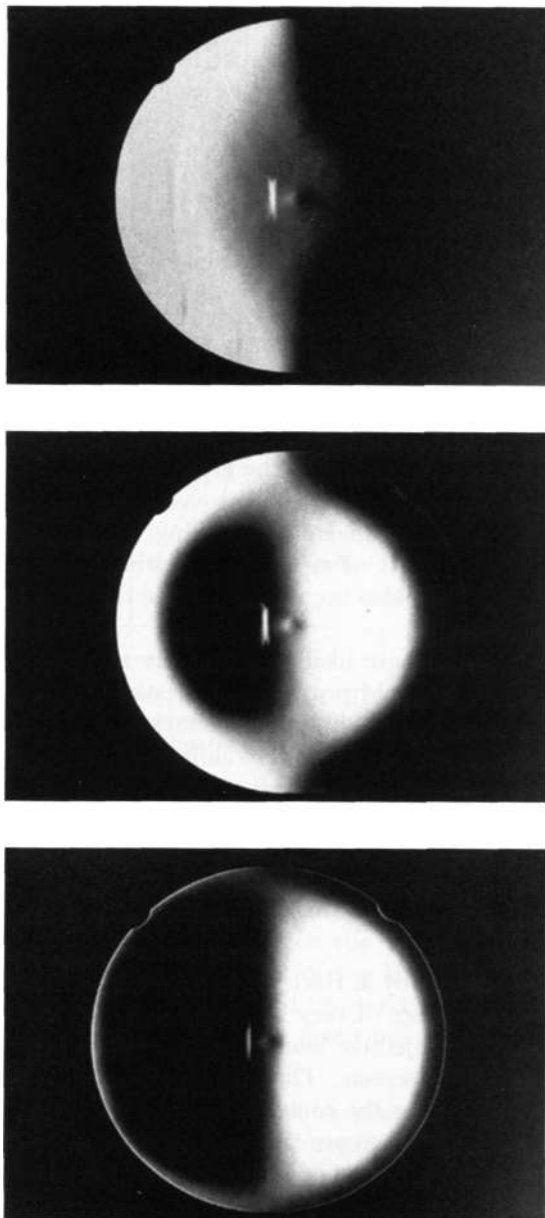


Рис. А-3. Фотографии трех случаев Рис. А-2 на параболическом зеркале. Яркие полосы — ложные отражения щели. (Фотографии Уильяма Герберта из Колумбуса, штат Огайо.)

3. В своих более сложных формах он требует утомительной и легко допускающей ошибки математической процедуры редукиции. Компьютеры могут помочь в этом расчете, но такие вычисления могут быть ошибочно обработаны на этапе ввода.
4. Это требует создания сложного устройства для проверки кромки ножа. Можно было бы создать более простые тестеры, если бы люди тестировали только длиннофокусные ньютонские зеркала, но быстрые инструменты не оставляют места для ошибок. Необходимо изготовить или приобрести очень хорошие платформы движения, называемые кинематическими ступенями, и компактные узлы источник/нож.

Варианты теста Фуко включают тест на каустику и тест на проволоку. Всех в той или иной степени беспокоят одни и те же трудности.

Еще одно применение теста «острым лезвием» можно было бы применить ко всем видам оптики, если бы оно было более удобным. Использование лезвия ножа в фокусе звезды восстанавливает условия, которые привели к серому плоскому виду сферы в центре кривизны. Этот метод проще всего обладателям отличного часового привода и тяжелого, непоколебимого крепления, ведь они могут следить за самыми яркими звездами. Какой-то метод постепенного введения ножа в сфокусированный луч также необходим, поскольку этот вариант теста Фуко чрезвычайно обидчив.

Поскольку немногие телескопы, скорее всего, будут полностью обнуляться, те, кто хочет использовать острую фокусировку, должны снабдить свою испытательную установку методом измерения длины смещения фокуса от ситуации, напоминающей А на рис. А-2, к ситуации С. В типичный тест, это смещение фокуса должно быть ниже 100 мкм (0,004 дюйма). Использование искусственной звезды, описанной в главе 5, облегчает проблемы с установкой, приводом часов и освещением, но какой-то измерительный винт все равно необходимо разместить на фокусере.

А.2 Тест Хартмана

Этот тест, разработанный Дж. Хартманном около 1900 года, чаще всего используется для проверки поверхности очень крупных обсерваторских инструментов. Экран центрируется над объективом или зеркалом. В этом экране вырезаны отверстия тщательного размера и расположения. Затем телескоп наводят на далекую звезду или искусственный источник в центре кривизны.

Затем экспонируются две фотопластинки: одна внутри фокуса, а другая снаружи. После того как они разработаны, их тщательно измеряют. Если тест успешен, изображения отверстий различимы, разрешены и не настолько велики, чтобы их положение было неопределенным. Две фотографии на самом деле не нужны, если расположение отверстий над зеркалом очень точно известно, но осторожность требует второй фотографии.

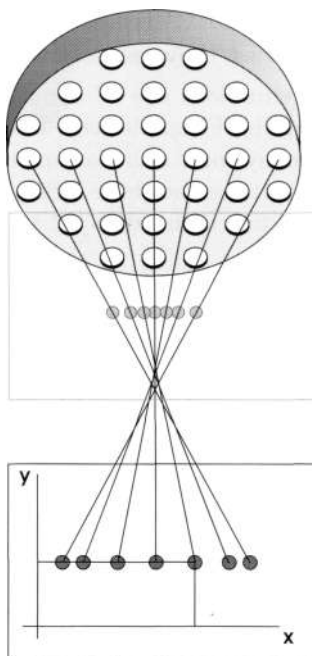


Рис. А-4. Конфигурация теста Гартмана. Прямоугольники представляют собой фотографические пластинки с пересечением пар точек, парящих между ними. Координаты измерений указаны на одной табличке.

Наконец, соответствующие точки на двух картинках связаны математически. Как только места пересечения пар точек известны, они вводятся в выражения, которые преобразуют продольные aberrации в ошибку волнового фронта при условии, что поверхность деформируется плавно. На рис. А-4 представлена диаграмма, показывающая, как тест Хартмана используется для измерения aberrации. Версия устройства Хартмана с двумя отверстиями сегодня иногда используется в качестве средства фокусировки (Suiter 1987).

Этот метод не рекомендуется для начинающих тестировщиков по следующим причинам:

1. Эти фотографии лучше всего делать на стеклянных пластинках. Область интереса вблизи фокуса небольшая, а фотопленка гибкая. И пластины, и оборудование для их обработки стоят дорого.
2. Во время экспонирования две пластины следует держать точно перпендикулярно оптической оси и друг другу.
3. Измерения положения точек обычно выполняются с помощью устройства для измерения пластин, которое выглядит как микроскоп или устройство для чтения микрофиш.

на станине фрезерного станка. Хотя они достаточно распространены в профессиональных обсерваториях, остальным из нас они недоступны.

4. Математические сокращения примерно такой же сложности, как и расширенные версии теста Фуко, но из-за количества связанных точек необходимо выполнить гораздо больше вычислений. Этот анализ данных может оказаться очень утомительной работой. (См. Danjon and Couder 1935, где описана ранняя процедура редукации, которая привела к появлению этой процедуры у Texereau 1984.)

А.3 Разрешение двойных звезд

Хотя определение разрешающей способности телескопа не является полным оптическим тестом, многие люди относятся к нему именно так. Таким образом, оно заслуживает упоминания здесь. Этот метод оценки изображений телескопа стал популярным в XIX веке, когда двойные звезды стали предметом очень активных исследований. Наблюдатели, которых прежде всего интересовало чистое разделение двух звезд, стали судить о работе своих телескопов исключительно по этой характеристике.

Конечно, телескоп, который не может показать двойные звезды, близкие к ожидаемому разрешению, демонстрирует один из симптомов плохой оптики, но другие типы столь же неприятных оптических проблем не проявляют себя таким образом. Сферическая абберация, длина волны $\lambda/4$ незначительно ухудшает способность телескопа расщеплять звезды. (См. график энергии в кружке в главе о сферической абберации.) Однако на деталях планет, требующих лишь умеренного разрешения, оптика с ошибками коррекции дает отчетливо нечеткие изображения.

На рисунке А-5а показаны различные критерии разрешения. Первый называется критерием Рэля, его не следует путать с критерием Рэля $\lambda/4$ -волновой предел Рэля ошибки волнового фронта. Критерий разрешения Рэля выполняется, когда расстояние между двумя объектами находится точно на радиусе теоретического диска Эйри. Другими словами, вторая звезда расположена в долине между центральным диском первой звезды и первым дифракционным кольцом.

Степень, в которой критерий Рэля разделяет звезды, зависит от деталей дифрагирующей апертуры. Различные препятствия и абберации приводят к разной глубине «седла» между звездами. Для идеально круглой апертуры без препятствий и аббераций падение между звездами составляет примерно 70% от максимальной яркости.

Второй критерий был сформулирован наблюдателем двойной звезды У. Р. Доусом в 1867 г. (Сиджвик, 1955). Это относится только к свободным апертурам, разделяющим равные звезды. По критерию Дауса разделение составляет чуть менее 85% от разделения, определенного в критерии Рэля. Рис. А-5а иллюстрирует это.

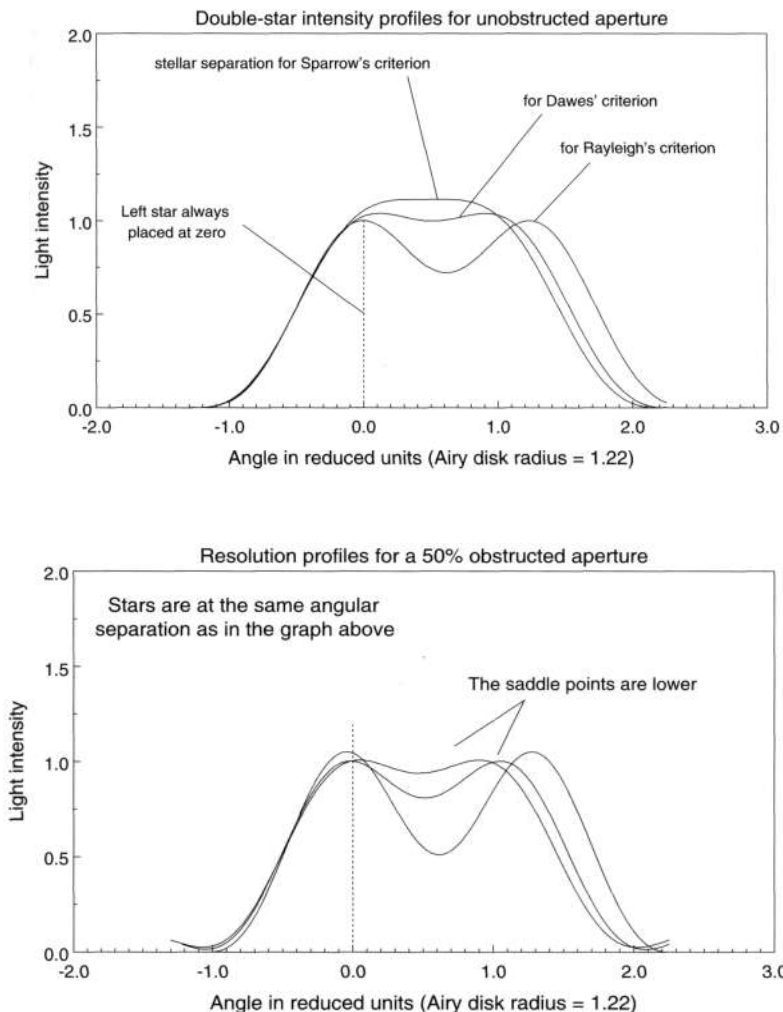


Рис. А-5. Разрешение звезд одинаковой яркости в двух инструментах: Вверху а) идеальная круглая апертура; Внизу б) те же звезды, что и в тот же инструмент, с 50% центральным препятствием. Огромное вторичное зеркало фактически улучшает разрешение.

как кривая интенсивности с небольшим перепадом интенсивности между звездами. Это падение касается только 1/30 магнитуды меньше максимальной интенсивности. Когда двойники настолько тесны, отсутствие округлости в них способствует различению двойственности в такой же или даже большей степени, чем перепад интенсивности между ними.

Третье и самое узкое расстояние называется критерием Воробья и определяется как расстояние, приводящее к образованию плоского перешейка между звездами.

Критерий Воробья корректируется для закрытых и аберрированных апертур до тех пор, пока он всегда не дает плоскую область между звездами. Таким образом, он всегда определяется однозначно и всегда обеспечивает одно и то же поведение, но его точное разделение зависит от деталей апертуры.

По критерию Воробья для беспрепятственных апертур звезды разделены примерно на 92% критерия Дауэса или примерно на 77% расстояния Рэля. На диаграмме MTF идеальной, беспрепятственной апертуры на рис. 3-6 критерий Воробья находится на пространственной частоте вне графика $1,06 \cdot c_{\text{Макс}}$. Такое размещение не означает, что решение иллюзорно. Некоторые наблюдатели с двойными звездами приблизились к этому значению или даже превысили его. Звезды представляют собой точечные объекты, а цель MTF состоит из полос. Точки можно разрешить, используя форму изображения в качестве единственного дискриминатора.

На рисунке А-5b изображен один из наиболее тревожных аспектов использования двойных звезд в качестве тестовых объектов. Суммарные дифракционные картины двух звезд, видимых в закрытой на 50% апертуре, рассчитаны с теми же расстояниями между звездами, которые использовались в открытой апертуре на рис. А-5а. Для всех трех кривых одинаковое расстояние приводит к более сильным провалам интенсивности между звездами. Чтобы восстановить поведение, изображенное на рис. А-5а, звезды необходимо сдвинуть ближе друг к другу. Короче говоря, апертура, закрытая на 50%, разрешает лучше.

Разрешение двойной звезды мало что говорит нам о других типах результатов наблюдений,¹ особенно в том случае, когда диафрагма, заблокированная на 50%, выйдет из строя. Изображения планет сильно искажаются из-за таких серьезных препятствий. Блокирование апертуры выбрасывает большую часть света за пределы центрального пятна в отдаленные части точечного изображения. На разрешение ближайшей звезды это мало влияет, поскольку звезда находится близко к центру изображения, а свет, дифрагированный препятствием, находится в значительной степени за его пределами.

Если искомый объект представлял собой небольшой малоконтрастный кратер на Луне, все изображение представляет собой сумму всего света, рассеянного световыми пятнами вокруг кратера, а также изображение кратера. Большая часть этого ложного света объединяется, чтобы затуманить интересное изображение. Рассеяния от любого отдельного диффузного пятна само по себе недостаточно, чтобы серьезно повредить изображение, но их совокупный эффект значительно ухудшает контраст.

Блокирование апертуры центральным препятствием на 50% помогает разрешать некоторые двойные звезды, но то же самое препятствие приводит к серьезному ухудшению изображения деталей планет. Вы можете легко проверить этот результат самостоятельно. Посмотрите ночью на Луну или планету с большим бумажным препятствием перед апертурой или без него. Если препятствие телескопа уже не велико, искусственно заблокированная апертура будет выглядеть намного хуже.

Используя разрешение двойных звезд в качестве единственного критерия оптического качества, астроном требует, чтобы решение было в пользу высоких пространственных характеристик.

¹Сам Доус хорошо осознал эту трудность, хотя его имя прочно связано с неправильным использованием этого теста как индикатора оптического качества.

частоты. В случае закрытых апертур пространственно-частотная характеристика была лишена некоторой силы промежуточных частот для достижения лучшего контраста на более высоких частотах.

Двойные звезды как тестовые объекты представляют и другие трудности. Переменность связана с небом и самими звездами. В идеале следует использовать равнояркие белые звезды, разделенные на дифракционном пределе, и требовать, чтобы они находились высоко на небе. Немногим звездам удобно расположиться таким образом. Обычно тест необходимо проводить со звездами разной яркости, разделенными расстоянием, близким к критерию Дауэса или Рэлея вашего прибора, но не точно на нем. Одна из звезд может иметь синий или красный оттенок, и они могут находиться на небольшой высоте, что приводит к неудачной атмосферной дисперсии и появлению радужных спектров. «Видение» ограничит количество ночей, в которые можно будет проводить испытания двойной звезды, особенно для больших инструментов.

Искусственные двойные звезды можно использовать для проверки разрешения, но они не могут устранить основные недостатки метода оценки. Поскольку необходимо использовать очень большое увеличение, турбулентность грунта должна быть низкой. Поднеся источник близко к телескопу, один писатель избежал проблемы турбулентности. В этом случае источник находился всего в 10 метрах (Маурер, 1991). Однако столь близкое расстояние делает такой тест ненадежной проверкой аберраций (см. главу 5).

Проблемы с атмосферой также беспокоят звездный тест, но поскольку звезды рассматриваются по отдельности, у вас больше свободы выбора одной на большой высоте. Поскольку звездный тест включает в себя осмотр гораздо большего расфокусированного звездного диска, он не всегда требует идеального зрения.

По вышеуказанным причинам тест разрешения двойной звезды не рекомендуется использовать в качестве универсального теста. Вкратце:

1. Тесты разрешения интересны тем, кто занимается двойными звездами. Разрешение малопригодно в качестве общего показателя производительности телескопа, поскольку оно предпочитает высокие пространственные частоты.
2. Подходящие целевые звезды найти сложно. У искусственных источников есть свои подводные камни.
3. Чтобы тест на разрешение двойной звезды дал интересные результаты, зрение должно быть превосходным.

А.4 Геометрический тест Ронки

Тест привлекателен, если он не требует значительной обработки или интерпретации данных. Один из таких тестов предполагает размещение крупной периодической решетки из темных и прозрачных полос рядом со звездным фокусом инструмента. Примерная частота такой решетки составляет 100 линий/дюйм (4 линии/мм), с

соответствующий период 0,01 дюйма (0,25 мм). Этот метод был исследован Васко Ронки примерно в 1923 году и поэтому получил название *Тест Ронки*.

Интерпретация, по крайней мере, когда мы предполагаем, что свет состоит из лучей, проста. Предположительно, свет возник из очень далекого точечного источника (например, звезды). Если звезда изображена правильно, она должна быть сфокусирована в одной точке. Звездный свет проходит через сетку прямых непрозрачных полос, которые удаляют попадающие на них световые лучи. Воспринимаемый узор на зеркале — это всего лишь тени этих вертикальных полос.

Если в оптике есть связанные с ней aberrации, свет от разных зональных радиусов не отклоняется к одному фокусу. В случае сферической aberrации различные точки пересечения осей распределены вблизи области каустики. Поскольку решетка находится на разных расстояниях от этих точек, кажется, что расстояние между решеткой, проецируемой на отверстие, варьируется от радиуса к радиусу. В случае недостаточной коррекции этот эффект показан на рис. А-6.

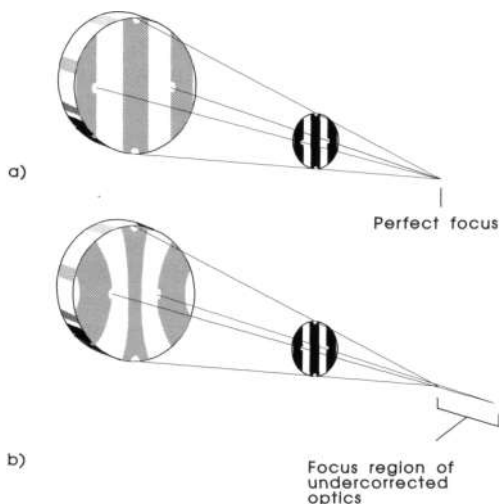


Рис. А-6. Линейку Ронки помещают возле фокуса звезды и рассматривают без окуляра: а) Если все лучи направлены в общий фокус, оптика идеальна, б) Если линии искажаются, они указывают на aberrации. Решетка Ронки не обязательно должна ограничиваться крошечным кругом. Любые полосы за пределами освещенной части светового конуса не вносят вклада.

Если решетка составляет 100 линий/дюйм, а светосила диафрагмы равна $f/8$, 2,5 периода (или «линии»), показанные в освещенной части решетки, будут находиться на расстоянии около 0,2 дюйма внутри фокуса и всего 0,025 дюйма в диаметре.

Кажется, что тест Ронки — это окончательный ответ, ясный и недвусмысленный нулевой тест. К сожалению, это не всегда работает таким образом.

В 1980 году мое внимание привлекло 10-дюймовое зеркало с диафрагмой $f/6$. Несмотря на то, что оно давало мягкое изображение, оно прошло тест Ронки с использованием решетки 100 линий/дюйм. Однако он потрясающим образом провалил звездное испытание. Когда зеркало было извлечено из трубки и проверено с помощью более сложного варианта теста Фуко, зеркало показало недокоррекцию на половину длины волн.

Тем не менее, он прошел тест Ронки в фокусе. Что-то было не так, то ли с одним из тестов, то ли с зеркалом. Взгляните еще раз на абберрированный рисунок Ронки на рис. А-6. Искажение рисунка, видимого на фоне зеркала, вызвано изменением фокусного расстояния, измеренного от решетки. Как показано, разница фокуса (или продольная абберрация) составляет около трети расстояния от решетки до средней точки фокуса, что приводит к сильному искажению линий Ронки, проецируемых на зеркало. Плотность линий в центре апертуры значительно выше, чем у края. Эту кривизну можно было бы назвать «33% искажением». Если область фокуса составляет гораздо меньшую долю расстояния до решетки, искажения могут быть заметно меньшими. Для оптики с обычными фокусными расстояниями и диаметрами это условие низких искажений справедливо в большинстве случаев.

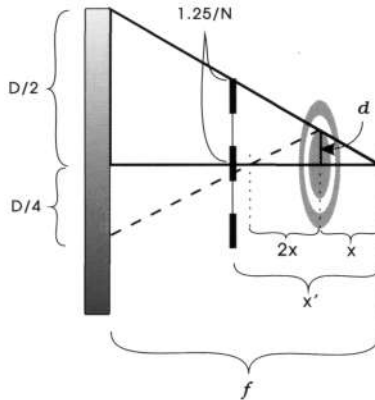


Рис. А-7.Схема подобных треугольников использовалась для оценки кривизны Ронки. Конкретные точки пересечения, выбранные здесь, будут характерны для чрезмерной коррекции, но их перестановка не повлияет на вывод в тексте.

Нетрудно вычислить длину области фокуса оптики, отводящей свет к краю дифракционного диска. Если мы нарисуем треугольники, подобные рис. А-7, то внешний треугольник будет иметь ребра высоты $D/2$ (половина апертуры) и основание $ж$. Треугольник вне фокуса имеет высоту $ди$ база $Икс,с,д$ - радиус дифракционного диска. Радиус диска Эйри равен $(1,22)(длина\ волны)(фокусное\ отношение)$, или $1,22 \lambda \Phi$. Мы можем использовать подобные треугольники, чтобы показать, что $ж = 2,44 \lambda \Phi^2$. Поскольку для оценки количества отображаемых линий мы должны рассматривать область конечного размера, плотность линий на краю

сравнивается с плотностью линий в точке примерно на половине радиуса зеркала. Пунктирная линия, поскольку она имеет только половину наклона, может пересекать расстояние примерно в два раза больше. Искот точки фокуса.2

Если свет от края отклоняется и пересекает ось более чем на 3Икскот света в зоне радиуса 50% он начинает полностью пропускать дифракционный диск, и становятся видимыми признаки серьезной оптической деградации.

Вертикальной пунктирной линией изображена решетка, расположенная между апертурой и областью фокуса. Он имеет те же 2,5 линии, что и рис. А-6, измеренные для внешней зоны. Над центром отображаются линии 1,25 («линия» — это полный цикл включения-выключения или период). Следовательно, высота этого маленького треугольника равна $1,25/H$, где H — количество линий на дюйм (или мм) решетки. Длина основания этого треугольника остается неизвестной и называется Икс'. Большой треугольник такой же, как и раньше. Снова используя подобные треугольники, можно показать, что $x' \approx 2,5 \text{ П/С}$.

Для расчета искажения оцениваем допустимое смещение фокуса, деленное на расстояние до решетки, или

$$\text{Искажение} = \frac{3Икс' \cdot 2,44\lambda F_2}{Икс \cdot 2,5(\Phi/H)} = \frac{3(2,44)\lambda FN}{2,5} \quad (\text{A.2})$$

Просто определив 2,5 как количество перехваченных линий решетки (называемых H),

$$\text{Искажение} \approx \frac{7,5\lambda FN}{H} \quad (\text{A.3})$$

Для оптики f/6 с решеткой 100 линий/дюйм, принимая за длину волны желто-зеленый цвет, который больше всего нравится человеческому глазу, максимально допустимое искажение при показателе 2,5 линий составляет около 0,04.

Любой, кто когда-либо пользовался одной из таких решеток, знает, что резкость рис. А-6 дает нереальное представление о происходящем. Настоящие тени размыты и нечетки. Прогиб линий на 4% при наличии этой размытости увидеть практически невозможно. На рисунке А-8 показана реальная закономерность, возникающая в результате $1/4$ длины волны недокоррекции, по-прежнему без размытия по краям линий.3

2Диск Эйри на этой диаграмме сильно преувеличен в размерах. Следовательно, точка пересечения пунктирной линии оказывается далеко не рядом. 2хот фокуса. Однако в реальных ситуациях с очень маленькими дисками Эйри внутреннее расстояние пересечения, вдвое превышающее расстояние от края, является отличным приближением.

3Этот шаблон не использует аппроксимацию в уравнении. А.3, но более точно рассчитывается с использованием адаптации метода Пругны (1991) с учетом ошибки коррекции.

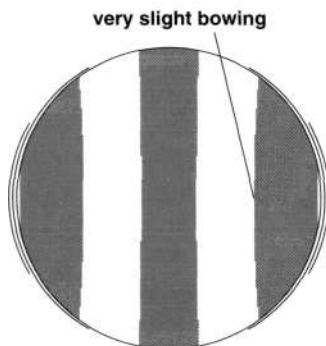


Рис. А-8. Искажение Ронки, ожидаемое от некорректированного телескопа с диафрагмой $f/6$ с длиной волны $\frac{1}{4}$ длины волны, когда решетка размером 100 линий/дюйм расположена рядом с фокусом и телескоп направлен на звезду. Тонкие внешние линии — границы интерференции первого и второго порядка.

Может быть установлено произвольное отсечение. Этот предел несколько искусственный, но давайте консервативно установим его на уровне 8%. Если мы не можем провести тест с максимальным изгибом строп не менее 8%, мы не проверяем оптику с какой-либо точностью, близкой к необходимой. Можно предположить, что фактическое пороговое значение должно быть выше, но в целях рассуждения давайте дадим преимущество геометрическому тесту Ронки.

Исследование уравнения. А.3 показывает, как тест Ронки может восстановить достаточную чувствительность, чтобы едва достичь предела. Если решетку переместить ближе к фокусу, уменьшив количество линий, видимых на апертуре, до 1,25, в этом зеркале линии будут искривлены на 8%. Если количество линий увеличить до 200 на дюйм, рисунку также исказится на 8%.

Эти решения содержат присущие проблемы. Хотя геометрический тест Ронки разработан с учетом лучевой аппроксимации, реальный мир не заботится о мышлении дизайнера. Это следует за волновой физикой. Помехи между зазорами на решетке приводят к наложению артефактов смещения, называемых *дифракционно-порядковые изображения*. Эти боковые изображения делают края полос менее четкими, скрывают поведение истинного края и в целом запутывают вид. Они становятся менее важными, поскольку все меньше и меньше линий сильно освещены, но их нельзя полностью устранить, поскольку внешние части изображения остаются тускло освещенными.

Дифракция белого света проявляется в виде размытия на краях линий, поэтому, если линия расширяется за счет приближения решетки (первое решение), размытие также увеличивается. Увеличение частоты линий (второе решение) удваивает углы, под которыми появляются изображения более высокого порядка, что делает края еще более трудными для просмотра. Грубые силовые методы

либо перемещение решетки, чтобы показать меньше линий, либо использование более мелкой решетки ограничены в их способности улучшить чувствительность.

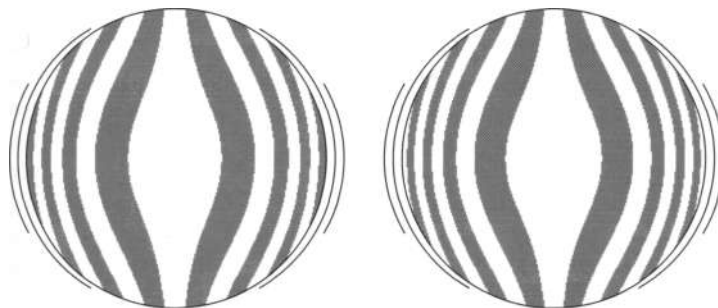
Снова обратившись к уравнению. А.3, искажения увеличиваются при тестировании оптики с большим фокусным числом. На $f/12$ мы достигли произвольного предела в 8% без каких-либо других изменений. Тест не стал вдруг более чувствительным, но при медленной оптике допуски шире. При высоких фокусных расстояниях тест Рончи действительно может отличить плохие системы от хороших.

Дополнительный метод удваивает чувствительность. Нулевой тест Ронки проводится не на далекой звезде, а на точечном источнике в фокусе. Свет выходит из инструмента в обратном направлении, отражается от оптической плоскости полной апертуры и проходит обратно через инструмент в обратном направлении. Вблизи фокуса он перехватывается решеткой Ронки. Этот режим автоколлимации удваивает аберрацию, поскольку оптика была пройдена дважды. Известный производитель Шмидта-Кассегрена тестирует телескопы таким способом. Поскольку аберрации увеличены вдвое, а фокусное расстояние $f/10$ изначально высокое, мы видим, что тест этого производителя является достаточно чувствительным. Проблема для обычных людей та же, что и для всех автоколлимационных тестов — огромные оптические плоскости стоят дорого.

А как насчет теста Ронки в центре кривизны? Несколько авторов-любителей предположили, что геометрический тест Ронки может быть успешным при стендовых испытаниях параболоидов в центре кривизны (Мобсби, 1974; Теребиж, 1990; Пругна, 1991 и Шульц, 1980). Проблема большинства этих тестов в том, что они никогда не рассчитывают чувствительность своих методов. Чтобы правильно показать чувствительность, необходимо вычислить форму диаграммы направленности как для идеальной оптики, так и для оптики, которая имеет погрешность коррекции в $\frac{1}{4}$ длины волны. Необходимо продемонстрировать, что эти две модели достаточно различны, чтобы можно было провести различие.

На рис. А-9 пример диаграммы идеального 16-дюймового зеркала с диафрагмой $f/4,5$ рассчитан вместе с диаграммой того же зеркала, если бы оно было полноразмерным. $\lambda/2$ длина волны некорректирована. Оба рассчитаны для решетки с шагом 150 линий/дюйм. Экран Рончи расположен в нескольких разных местах, которые выглядят одинаково рядом с центром зеркала. Один образец для зеркала лучше, чем любая оптическая поверхность, когда-либо созданная. Другой образец предназначен для зеркала, которое имеет небольшую или незначительную полезность в астрономическом инструменте. Рисунок А-10 представляет собой фотографию именно этой ситуации. Фотография показывает, как ни один теоретический аргумент, трудности геометрического теста Ронки в центре кривизны.

Проблема с тестом Рончи, проводимым в центре кривизны, заключается в том, что он перегружен чрезмерной коррекцией асферических зеркал, работающих далеко от их естественного фокуса на бесконечности. Экран Рончи настолько явно на что-то реагирует, что забываешь, что разница между реакцией на плохое зеркало и на хорошее зеркало может быть незначительной. Недо-



а) недокоррекция на 1/2 длины волны

б) идеальный

Рис. А-9. Теоретические закономерности получены для линейки Ронки 150 линий/дюйм, помещенной немного внутри центрального фокуса 16-дюймового зеркала с диафрагмой $f/4,5$: а) если зеркало $\frac{1}{2}$ длины волны недокорректировано; б) если зеркало идеальное. Расстояния: а) — 0,06 дюймов и б) — 0,05 дюймов.

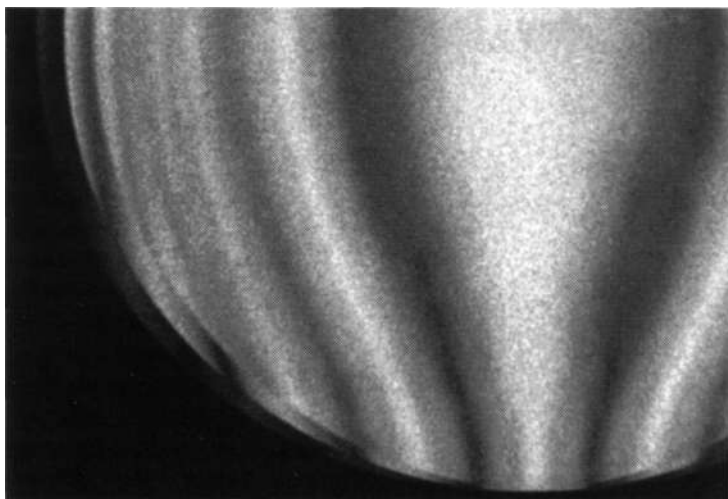


Рис. А-10. Фотография теста Ронки на реальном зеркале, рассчитанная на рис. А-9. Зеркало идеально или ужасно? Зеркало было проверено Фуко и признано. Длина волны $\lambda/8$ недокорректирована. Паттерны Фуко показаны на рис. А-3. (Фотография Уильяма Герберта.)

исправленный вытянутый сфероид, идеальный параболоид и сверхкорректированный гиперболоид. всевыглядят сильно переэкспонированными в центре кривизны. Все, кроме самых высоких фокусных чисел, демонстрируют это состояние.

Для 16-дюймового зеркала $f/4,5$ в центре кривизны длина размытой области фокусировки составляет около 0,444 дюйма (11,3 мм). Вот что

Экран Рончи действует. Однако длина этой области составит 0,428 дюйма, если зеркало недостаточно скорректировано прямо в точке. Предел Рэлея $\lambda/4$ длины волны или 0,460 дюйма, если он чрезмерно исправлен. Эта разница в 0,016 дюйма незначительна, всего лишь небольшая корректировка сильно искаженных узоров Ронки.

Чувствительность можно восстановить, используя кинематическую измерительную платформу и сопоставив *число* теоретических моделей, постоянно стараясь записывать продольное движение экрана Ронки (как в Prugna 1991). К сожалению, тест почти никогда не проводится таким образом, вероятно, потому, что он очень похож на тест Фуко, которого пользователь изначально пытался избежать.

Профессиональные оптики разбирались с чувствительностью теста Рончи. Корнехо и Малакара (1970) пишут:

Тест Рончи — очень мощный тест для сферических и асферических зеркал. Однако точность этого теста ограничена дифракцией до такого значения, что полученную поверхность можно использовать для формирования изображений. *но не для интерферометрического анализа волновых фронтов.* [Курсив добавлен.]

Другими словами, в результате теста можно создать поверхности, достаточно точные для использования в камерах или других устройствах грубого формирования изображения, но не поверхности, которые настолько точны, что их можно протестировать с помощью интерферометра. Такая точность требуется в астрономических телескопах.

Сам Рончи отметил точность геометрического теста, носящего его имя (Ronchi 1964). В превосходной обзорной статье он говорит:

Поскольку используемая решетка имела очень низкую частоту, как и та, которую мы использовали вначале и которая также использовалась другими авторами, рассматривающими тот же аргумент, геометрические рассуждения вполне соответствовали результатам экспериментов и измерений; *но в то же время метод не привел к столь прекрасным результатам, как хотелось.* Было очевидно, что для увеличения этой чувствительности придется использовать решетки максимально возможной частоты, но тогда результаты решительно отклонялись от предсказанных геометрическими рассуждениями. [Курсив добавлен.]

Здесь Рончи описывает свое оправдание отказа от геометрического теста в 1920-х годах. Далее он описывает методы использования перекрытия порядков дифракции в качестве интерферометрического теста. Оценка производится путем сложной интерпретации двух одинаково аберрированных волновых фронтов, несколько смещенных друг относительно друга. В этом истинном тесте Ронки, основанном на волновой оптике, разделение теней определяется не геометрией, а интерференцией света.

Однако геометрический тест Ронки имеет некоторые применения. Это отличный способ увидеть острые зоны. Он может обнаружить серьезно неисправную оптику — кривизны фокуса звезды часто бывает достаточно, чтобы выбросить инструмент из-под контроля. Это хороший способ проверить оптику камеры или любую оптику, используемую далеко от дифракционного предела. Но этот тест имеет переменную чувствительность, которую многие сторонники недооценивают или игнорируют.

Читатели могут заметить, что если бы правило Рончи заменила шахматная сетка из квадратов, тест Рончи имел бы поверхностное сходство с тестом Хартмана. Углы квадратов будут эквивалентны положениям отверстий. Однако никаких жалоб на чувствительность теста Хартмана не поступало. Принципиальное отличие состоит в том, что экран Хартмана жестко закреплен на апертуре, а не плавает где-то рядом с фокусом. Пластины экспонируются и данные снимаются с помощью высокоточных измерительных приборов. Систематические ошибки уменьшаются за счет измерения положения точек пластиной с разных направлений. За этими необработанными измерениями следует сложная математическая процедура обработки.

Многие любители, особенно те, кто пропагандирует использование геометрического теста Ронки в центре кривизны для асферической оптики, представляют этот тест как простое сравнение образцов. Они убрали математику, а вместе с ней и способность теста обнаруживать ошибки. Песня сирены геометрического теста Ронки заключается в том, что люди могут просто посмотреть на образец и избежать трудностей с измерением. К сожалению, измерения содержат чувствительность.

Подводя итог, можно сказать, что геометрический тест Ронки не рекомендуется специалистам по оценке телескопов по следующим причинам:

1. Чувствительность теста варьируется и зависит от фокусного расстояния испытуемой оптической системы и частоты используемой решетки. Кроме того, результаты различаются в зависимости от того, проводится ли тест в фокусе или в центре кривизны. Определенные комбинации очень чувствительны; другие комбинации фатально нечувствительны.
2. Геометрический тест Ронки при проведении в центре кривизны обычно используется как простое сравнение рисунков, однако изгиб таких рисунков может мало отличаться от рисунков с недопустимыми ошибками коррекции.
3. Это требует достаточного знакомства с теорией теста, чтобы можно было рассчитать неприемлемую картину «наихудшего случая». Прежде чем объявить, что протестированная оптика прошла успешно, необходимо иметь представление о том, как выглядит неисправность. Хорошим местом для начала является расчет ожидаемого тестового шаблона с учетом и без него. $1/4$ длина волны сферической аберрации низкого порядка на волновом фронте.

А.5 Интерферометрия

Многие типы интерферометров используются для проверки телескопов. Здесь нет смысла останавливаться на каждом из них. Большинству из них требуется дорогостоящее вспомогательное оборудование, поэтому вероятность того, что один из этих методов будет использован человеком, желающим просто протестировать один телескоп, мала. Пример интерферометра будет служить для демонстрации этой техники, метода, который, на первый взгляд, требует меньше оборудования, чем большинство других.

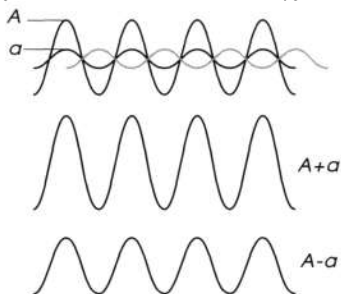


Рис. А-11. Принцип вмешательства.

А.5.1 Как работают интерферометры?

Свет — это волна, а две волны одинаковой частоты складываются путем суммирования амплитуд A и a . Если волны движутся в противоположных направлениях, в результате образуется стоячая волна, подобная гитарной струне. Если волны движутся в одном направлении, в результате образуется волна, амплитуда которой может достигать $A+a$ или всего лишь $A-a$, в зависимости от соответствующих фаз. (См. рис. А-11.) Эта волна является результатом *вмешательства*.

Редко можно ожидать, что две волны выстроятся в одном направлении достаточно хорошо, чтобы увидеть видимые, достаточно стационарные интерференционные эффекты в природе. Действительно, этот эффект почти неизвестен при использовании источников рассеянного белого света. Исключение составляют тонкие пленки.

В случае тонких пленок падающий световой луч дважды быстро отражается от двух почти параллельных поверхностей. Самый распространенный способ достижения параллельных поверхностей в природе — это использование жидкостей. Таким образом, наш первый опыт тонкопленочной интерференции обычно связан с цветами мыльного пузыря. Тонкопленочная интерференция также встречается в крыльях некоторых насекомых, перьях птиц и раковинах моллюсков. У него даже есть название, которое было придумано еще до того, как было достигнуто физическое понимание. *переливчатость*, в честь Ирис, древней богини радуги.

Цвет мыльного пузыря обусловлен тем, что отражение снаружи пузыря мешает отражению изнутри. (Если вы хотите провести эксперимент, цвета легче увидеть на мыльной пленке, все еще удерживаемой в петле.) Сила отражения от границы раздела воздух-мыльная вода примерно такая же, как сила отражения от границы раздела воздух-мыльная вода. интерфейс мыльная вода-воздух, поэтому интерференция мыльных пузырей должна иметь высокий контраст. Цвет предпочтителен на тех частотах, для которых одно отражение не совпадает по фазе с другим на величину, кратную длине волны цвета.

Что происходит с теми цветами, для которых условия неблагоприятны? Волна содержит энергию, и эта энергия не исчезает, когда волна прекращается. Если один путь заблокирован, он идет в другом направлении. Свет проходит прямо.

Причина, по которой мы вообще видим цвета, заключается в том, что мыльные пузыри такие тонкие. Если бы поверхности имели два отражения с фазовой задержкой, равной 1000 длин волн синего света, это было бы 999 длин не очень синего света, 998 еще менее синего и так далее. Было бы предпочтительнее столько частот, что отраженный свет снова стал бы бесцветным. Спектральный отклик будет напоминать карманную расческу, из которой торчат многие выбранные частоты. Однако наши глаза не чувствительны к такой тонкой структуре, и мы видим только белый свет.

По той же причине мы не видим пузырькового цвета в обычных окнах. На самом деле этот цветовой эффект наблюдается только на определенном этапе эфемерной жизни пузыря. Свежая мыльная пленка толстая, поэтому можно увидеть, как множество частот суммируются, образуя грубое приближение к белому цвету. По мере испарения он проходит стадию переливчатости, цвет которой зависит от локальной толщины. На короткое время появляются полосы красного, желтого, зеленого, синего и фиолетового цветов. Затем наступает этап, когда все цвета отражения одинаково обескуражены. Пузырь окрашен в бледно-белый цвет или снова в белый с желтым оттенком.

Пузырь по-прежнему ведет себя как барьер, когда он кажется бледно-желтым, но вскоре он станет настолько тонким, что длина волны света вообще не сможет ощутить границу раздела. Если пузырек живет долго, тщательный осмотр позволит обнаружить участок пленки, где он фактически невидим. Слой настолько тонкий, что не может существенно препятствовать продвижению волны вперед.

Если бы вместо использования белого света мы осветили новую пленку только одним цветом, что бы мы увидели? По мере высыхания пленки она переходит из невидимой в видимую в любом заданном месте, в зависимости от того, предпочтительна ли эта длина волны для отражения. Пузырь выглядит потресканным и потертым в зависимости от того, насколько быстро он высыхает в определенном месте, и наблюдатели могут сказать, что он все еще целый, только взглянув на края.

Принципы интерференции, продемонстрированные на примере мыльного пузыря, могут помочь нам понять, как работают интерферометры. Если мы сможем создать один идеальный волновой фронт или, по крайней мере, известный волновой фронт, мы сможем использовать его для вмешательства в

неизвестный волновой фронт наших телескопов. Если волновые фронты идентичны, интерференция будет одинаковой по всей апертуре.

Приводится простой пример, иллюстрирующий идеи, лежащие в основе этого принципа. Допустим, мы хотим протестировать плоскость, используемую для диагонального зеркала. Мы установили его в конфигурации рис. А-12 с известной оптической плоскостью, осветили его сверху достаточно чистым желто-зеленым светом и отодвинули достаточно далеко в вертикальном направлении, чтобы перспектива не вызывала каких-либо эффектов ее собственной. Здесь тонкая пленка — это не стекло или мыльная вода, а клин захваченного воздуха.

Если диагональ плоская и блоки (на самом деле тонкие полоски бумаги) имеют одинаковую толщину, можно будет обнаружить однородную яркость в зависимости от относительных фаз двух отражений. Такой точности практически невозможно достичь только благодаря удаче. Скорее всего, вы увидите, как на рис. А-12а, тонкую пленку воздуха величиной H длины волн с одной стороны $H + n$ длины волн с другой. Если мы проследим за ходом света, проходящего через стекло и отражающегося от двух слоев, мы увидим, что два отражения имеют разность фаз $2H$ длины волн на короткой стороне клина и $2H + 2n$ длины волн на другой стороне (с точностью до константы). можно вычесть $2H$ разность фаз, поскольку она одинакова по всей детали и концентрируется на $2n$. Из обсуждения мыльных пузырей выше следует, что светлые полосы должны появиться в тех местах, где интерферирующие фазы разделены волной 0, 1, 2 и т. д., а темные полосы должны появиться там, где фазы разделены $1/2$ волна, $3/2$ волна, $5/2$ -волна и т. д. Поскольку разность фаз возникает в результате отражения, которое удваивает расстояние, на которое распространяется свет, при каждом увеличении на половину длины волны при разделении пластин возникает полоса. Кроме того, стержни должны быть прямыми, как на рис. А-12б, поскольку расстояние меняется только в направлении смещения.

Однако если диагональ не плоская, столбцы изгибаются, как показано на рис. А-12с. Мы можем легко рассматривать темные полосы (так называемые «бахромы») как контуры исследуемого образца, разделенные половиной длины волны света. Протянув темную нить через тестовую установку, мы можем даже оценить степень кривизны. Этот корпус отклоняется не более чем на половину полосы, поэтому испытуемый образец плавно изогнут чуть меньше, чем $1/4$ длины волны.

Этот тест можно легко распространить на другие формы. Если известная поверхность представляет собой выпуклый параболоид, изготовителю ньютоновского телескопа нужно просто проверять и полировать ее, пока стержни не станут прямыми. Правда в том, что никто не работает таким образом, потому что все созданные детали должны иметь одинаковый фокус.

На практике такой тест проводится с использованием мягкой конденсирующей линзы чуть выше двух частей (интерферометр Физо). Такое расположение концентрирует возвращающийся свет и исправляет падающий рассеянный луч, чтобы оптик мог приблизиться.

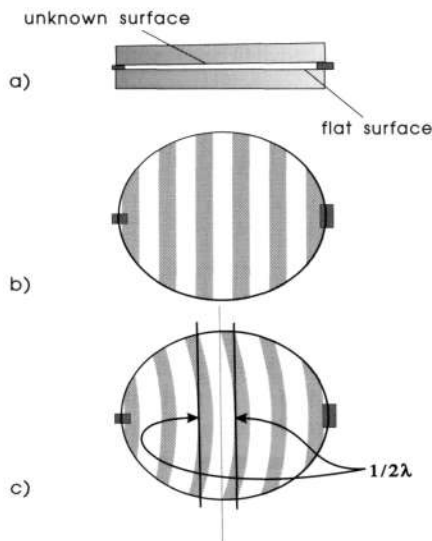


Рис. А-12. Помехи от тонкого края воздуха используются для проверки качества поверхности летучей мыши.

длина (без уважительной причины). Оптику нужен мощный стимул, прежде чем он понесет расходы на изогнутый испытательный образец. Производитель камеры, у которого могут быть жесткие допуски на тысячи сферических деталей, имеет веское обоснование для их изготовления. У испытателя телескопа есть более простой путь.

Наиболее легко интерпретируемые интерферометрические тесты имеют одну общую особенность. Они всегда начинаются с одной балки, разделенной на две части. Один становится «опорным» лучом, а другой луч передается через оптику. Опорному волновому фронту необходимо придать ту же сходящуюся форму, которую он приобрел бы, если бы прошел через идеальную оптику. Наконец, лучи должны быть сведены вместе с наклоном всего на несколько длин волн. После всех этих отклонений два луча должны иметь примерно одинаковую амплитуду, чтобы обеспечить хороший контраст между яркими и темными полосами. Например, если бы нижняя поверхность была алюминизирована в приведенном выше примере, полосы были бы очень слабыми. Один интерферирующий луч будет исходить от прозрачного стекла (возможно, коэффициент отражения 4–5%), а другой будет сильно отражаться от алюминиевого покрытия (коэффициент отражения 92%). В этом случае покрытие следует удалить, чтобы использовать интерферометрию.

Еще одно условие, которое необходимо соблюдать, — примерно равная длина пути. Источник света в конечном итоге состоит из молекулярного или атомного перехода с конечной шириной линии, что, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, подразумевает локализацию светового луча. Типичный поток электромагнитной энергии, возникающий в результате одного перехода, представляет собой волновой пакет около

0,5 м в длину. Если луч разделен на половину для поступления в компактный «идеальный» преобразователь (куда он сразу возвращается), а другую половину — на оптику, то эти две длины пути не должны отличаться более чем на 0,5 м, если два луча успешно вмешиваться. Эту ситуацию значительно облегчает использование лазера, имеющего большую длину когерентности.

А.5.2 Точечный дифракционный интерферометр

Интерферометрический тест обычно требует дополнительного оборудования высочайшего качества. Однако элегантное решение было изобретено Р. Н. Смарттом и Джоном Стронгом (1972) и анонсировано ими на конференции Оптического общества Америки. Этот метод требует изготовления сложной маски, но, по-видимому, изолированный работник все равно может попытаться провести тест из-за ее низкой стоимости. Об испытаниях телескопа сообщили Смартт и У.Х. Стил (1975), а оценка неизвестных волновых фронтов упоминалась другими (Альфред и Миллс, 1989; Маллик, 1978). Этот метод также появился в популярной литературе (Delvo 1985).

Аберрированный луч телескопа отображается в виде размытого пятна, большего, чем дифракционный диск идеальной апертуры, но все же достаточно маленького, чтобы быть близким к правильному размеру. Аберрация сохраняется в фокусе, но только в том случае, если в нее вносит свой вклад весь волновой фронт. Если где-то рядом с фокусом поместить непрозрачную маску с крошечным отверстием, прошедший через это отверстие луч будет сферически расходиться, независимо от того, где находится отверстие. Этот идеальный волновой фронт возникает потому, что каждая отдельная часть волнового фронта ведет себя идеально. Сумма всех этих пятен в плоскости фокуса ведет себя несовершенно, поскольку они взаимно противофазны. Другой способ подумать об этом — использовать аргумент фильтрации. Из изображения, проходящего через крошечное отверстие, было отфильтровано так много пространственной информации, что возникающий сигнал не может не быть чистым.

Поскольку это крошечное отверстие увеличивается в размерах, создаваемый им волновой фронт остается приблизительно сферическим, пока отверстие не станет размером с идеальный дифракционный диск. Затем, что вполне разумно, он начинает деградировать до настоящего волнового фронта.

Этот процесс очень интересен, но все равно бесполезен, поскольку ничто не мешает этому идеальному волновому фронту. Если маску убрать, исходный волновой фронт присутствует, но не существует идеального волнового фронта, с которым он мог бы интерферировать. Однако если непрозрачную маску сделать слегка прозрачной, можно добиться того, что идеальный волновой фронт, выходящий через отверстие, будет интерферировать со значительно уменьшенным исходным волновым фронтом.

Схема точечного дифракционного интерферометра представлена на рис. А-13. Оригинал

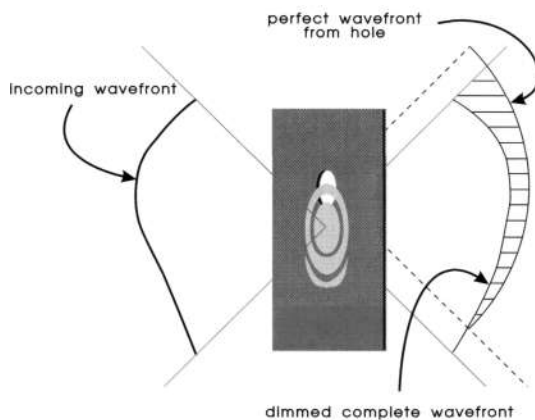


Рис. А-13. Точечный дифракционный интерферометр.

Волновой фронт и волновой фронт, выходящий через отверстие, различаются облицованной областью. Если требуется несколько видимых полос, отверстие необходимо сместить до тех пор, пока сфера не будет наклонена относительно затемненного полного волнового фронта на несколько длин волн. Дыра перемещается к внешним частям изображения, и идеально сферический волновой фронт, выходящий из этой децентрированной дыры, становится очень темным. Пропускание маски должно быть установлено на низком уровне, чтобы получить высококонтрастные полосы.

Первый недостаток этого теста заключается в том, что большая часть света отсекается. Эту проблему можно решить, затемнив комнату и позволив глазам адаптироваться, или используя фотографию с длинной выдержкой. Вторая трудность связана с изготовлением маски. Максимальный радиус отверстия является фиксированной функцией фокусного расстояния, $d = 1,22\lambda F$, так что с этим числом проблем не будет. Но пропускание маски должно варьироваться от 0,005 до 0,05 в зависимости от серьезности aberrации и желаемого наклона.

Большинство пользователей предпочитают избегать вырезания отверстия. Вместо этого они делают это частью операции фильтрации. Фильтр можно сделать из почти экспонированного куска мелкозернистой фотопленки. Отверстия создаются путем затемнения пленки крошечными микросферами на этапе экспонирования, как в статье Дельво, или эти сферы могут затемнять предметное стекло во время частичного алюминирования. Смартт и Стил также описывают регулируемую маску пропускания, состоящую из двух поляризующих слоев, один из которых проколот. Для настройки такой маски поворачивают непроколотый поляризатор до тех пор, пока не появятся высококонтрастные полосы. Этот поляризатор погружен в жидкость, имеющую тот же показатель преломления, что и крепежный пластик поляризационного материала.

Хотя в этом тесте обычно используется лазер и он проводится в режиме автоколлимации при стендовых испытаниях, схема с общим лучом не требует использования монохроматического света. Автоколлимация также не требуется. Смартт и Стил описывают эксперимент, проведенный в фокусе большого телескопа на изображении звезды. Испытание требовало отличного зрения, устойчивой посадки и, возможно (хотя не говорили), необычайного терпения.

В статье Дельво сложность изготовления этих масок уменьшена. Капли жидкой ртути разбиваются о фотопластину высокого разрешения, покрывая ее крошечными ртутными сферами.⁵К сожалению, такие умные методы изготовления не могут решить самую серьезную проблему теста — выравнивание точечных отверстий. Маску необходимо расположить на расстоянии нескольких десятков микрон от центра рисунка. Кинематический столик необходим, если пользователь хочет избежать мучительных усилий, предпочтительно столик с тремя осями.

Вкратце, трудности испытания точечного дифракционного интерферометра заключаются в следующем:

1. Это тестовое изображение очень тусклое.

2. Количество видимых полос и контраст интерференционной картины связаны друг с другом, поскольку яркость пятна падает по мере его децентрирования.

3. Для удобства эксплуатации требуется дорогостоящий кинематический столик.

4. В центре кривизны тестирование несферического зеркала затруднено, поскольку полосы перестают быть прямыми. Программное обеспечение для сокращения тестов доступно, но его выгодное использование по-прежнему требует большой осторожности и усилий.

5. Наиболее удобная конфигурация требует автоколлимационной плоскости полного диаметра.

А.6 Нулевой тест

Этот тест на самом деле является подмножеством многих других. Короче говоря, нулевой тест включает в себя конфигурацию тестирования, в которой идеальный результат прост и не требует дальнейшего сокращения. Таким образом, критерий Фуко решительно *не* нулевой тест, когда парабола тестируется в центре кривизны, а острая кромка находится в фокусе удаленного источника или звезды *является* нулевой тест. Если оптика хорошо прорисована, то вся поверхность будет затемняться равномерно. Точно так же точечный дифракционный интерферометр, используемый в фокусе звезды, является нулевым тестом. Если оптика идеальна, полосы прямые. Аналогично ведет себя тест Ронки в фокусе звезды; оптика, прошедшая проверку, показывает прямые тени от полосок на диафрагме. Если автоколлимация на полной апертуре плоская

⁵Ртуть токсична, и воздействие ее имеет кумулятивный характер. Будь осторожен.

используется, многие тесты в этой главе становятся нулевыми тестами. Даже звездный тест соответствует требованиям.

Здесь слова «нулевой тест» ограничены и обозначают те заводские испытания, в которых сферическая аберрация правильно сформированной поверхности устраняется путем введения противоположной сферической аберрации в луч, выходящий из источника. В качестве примера будет использован нулевой тест Далла, поскольку он широко распространен в любительской литературе, но существует множество устройств для проверки нуля, некоторые из которых превосходят тестер Далла.

Нулевой тестер Далла выглядит как тестер Фуко, за исключением того, что отверстие источника находится за небольшой плоско-выпуклой линзой. Эта линза создает равную и противоположную величину сферической аберрации на луче, который обычно сферически расходится от точечного отверстия. Хорошее параболическое зеркало изгибает волновой фронт обратно в сужающуюся сферу. Когда нож входит в изображение точечного отверстия, он не создает искаженных узоров Фуко, показанных на рис. А-2 или А-3. Он гаснет, как если бы проверял сферу.

Нулевые тестеры по своей сути не являются ошибочными, несмотря на плохую репутацию, которую они получили во время фиаско космического телескопа Хаббл. Тем не менее, множество проблем затрудняют проведение нулевого теста Далла, в том числе следующие:

- 1. Объектив тестера должен быть безупречного качества. Он должен иметь хорошую точность кромок и поверхностей, примерно ту точность, которую надеется получить тестер. Плохую линзу нельзя использовать для проверки хорошего зеркала.**
- 2. Длина волны больше не свободна; нулевое тестирование не следует проводить в условиях белого света. Расчеты правильного разделения линзы-обскуры во многом зависят от показателя преломления линзы и будут действительны только для одного цвета. Чтобы использовать этот тест, необходимо иметь полную информацию о преломляющих свойствах хрусталика. Между лампой и точечным отверстием следует поместить цветной фильтр, чтобы ограничить полосу пропускания используемого света.**
- 3. Расстояние между линзой и точечным отверстием должно быть установлено очень точно, иначе тест будет нулевым не для идеальной оптики, а для чрезмерно или нескорректированных волновых фронтов. (Тестирование на телескопе «Хаббл» провалилось по той же причине.)**
- 4. Ось узла обскуры-линзы должна быть очень тщательно выровнена по центру зеркала.**
- 5. Нулевой тест Далла имеет зональную сферическую аберрацию, которая приводит к неправильной кривизне, когда быстрые зеркала изготавливаются в соответствии с испытательным устройством. Это не точный ноль (Buchroeder 1994).**

Приложение Б

Методы расчета

Чтобы создать в этой книге узоры, подобные фотографиям, передаточные функции модуляции и другие графики, необходимо было использовать принцип Гюйгенса-Френеля в контексте оптики Фурье. Дальнейшее представляет собой лишь краткое изложение используемых здесь концепций. Для получения более подробной информации обратитесь к ссылкам, указанным ниже. Наиболее читаемой является книга Джозефа В. Гудмана *Введение в оптику Фурье* (Гудман 1968) или текст Юджина Хекта *Оптика* (Хехт 1987).

АПЕРТУРА, одна из программ, упомянутых в этом приложении, была выпущена в качестве дополнительного программного обеспечения к этому тому. Эта программа позволяет рассчитывать аксиально-симметричные узоры, наблюдаемые в тексте, включая сферическую аберрацию, центральное препятствие, зоны, повернутые края, аподизированные апертуры и другие. Хотя эта программа не является обязательной для понимания положений, изложенных в предыдущих главах, реалии публикации ограничивают количество изображений, которые могут здесь появиться. АПЕРТУРА позволяет себе роскошь исследовать мелкие детали некоторых наиболее интересных дифракционных явлений.

В.1 Принципы дифракции

Глава 4 представляет собой упрощенное введение в некоторые идеи, лежащие в основе дифракции и принципа Гюйгенса-Френеля. В целях обсуждения мы предположили, что каждая точка волнового фронта переизлучает волну. Однако у этой удобной фантастики есть некоторые трудности. Если позволить каждой точке излучать одинаково во всех направлениях, апертура будет произвольно отражать обратно в пространство часть достигшей ее энергии.

Отражение на апертуре не наблюдается и не наблюдается ни в одной точке волнового фронта. Волны не меняют внезапно направление, если не сталкиваются с изменением среды. Сумма волн также не дает

правильный ответ при интегрировании ситуации без апертуры, только с источником света и приемником. Интеграл идет по полной сфере, а излучатели, расположенные под прямым углом между источником и приемником, имеют слишком большой вес.

Френель понял, что это препятствия, поэтому сделал некоторые приближения. Его модель не основывалась на основных принципах, что, вероятно, помогает объяснить пристальное внимание со стороны таких выдающихся людей, как Пуассон. В начале 19 века еще не был понят даже физический процесс, вызывающий свет.

Более поздние исследования Густава Кирхгофа создали версию теории Гюйгенса-Френеля, основанную на первых принципах. Его результат, названный формулой дифракции Френеля-Кирхгофа, больше не требует игнорирования направления назад, хотя и требует соблюдения нескольких условий:

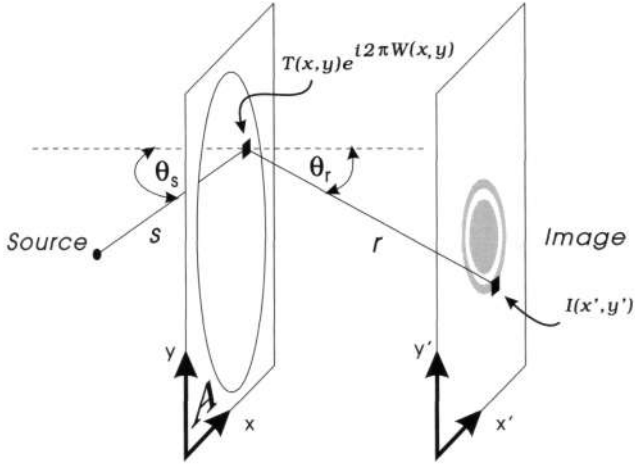
1. Свет моделируется как скалярная волна. Поляризация не предусмотрена. Модель не учитывает векторную природу света.
2. Значения поля возле апертуры такие же, как и в отсутствие апертуры (взвешенные по простой тригонометрической функции).
3. Расстояние от апертуры достаточно, чтобы гарантировать отсутствие связанных или исчезающих полей.

Одним из следствий второго условия является одновременное указание обоих значений поля на апертуре в дополнение к их производным. Гармоническая во времени форма волнового уравнения¹ представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка, для которого нормальный метод решения заключается в установке либо значения поля на границах, либо производной этого поля. Необычно, что Кирхгоф дал и то, и другое.

Учитывая его завышенные границы, мы должны рассматривать решение Кирхгофа как приближение. Это приближение не повлияет на результаты, если апертура не имеет большой структуры. Мы можем справедливо подозревать, что уравнение Френеля-Кирхгофа будет менее точным для таких устройств, как дифракционные решетки высокого разрешения. Для пологой оптики, большая часть которой имеет много длин волн со всех краев, аппроксимация не вызывает особых проблем. Более подробную информацию об этой критике можно найти у Бейкера и Копсона (1950).

Модифицированная форма формулы Френеля-Кирхгофа (с использованием переменных de

¹Эта формулировка называется *Уравнение Гельмгольца*.



Инжир.Бл.Переменные, входящие в формулу Френеля-Кирхгофа. Отверстие находится на поверхности A.

штраф на рис. Б-1) составляет

$$U(x',y') = \frac{1}{H} \iint_A T(x,y) e^{i2\pi W(x,y)} \frac{e^{i\pi(r+s)/\lambda}}{r s} \left(\frac{\cos\theta_s + \cos\theta_r}{2} \right) dx dy \quad (Б.1)$$

Здесь, H является произвольной нормировкой, зависимость от времени подавлена. $U(x',y')$ — значение поля в месте расположения изображения (x',y') . (Версии формулы для равномерной передачи получены в Necht 1987, стр. 461–462; Goodman 1968, стр. 37–41; Born and Wolf 1980, стр. 378–380.) Интеграл может быть выполнен по всей поверхности A, но подынтегральная функция отлична от нуля только внутри апертурного зрачка.

Термин $T(x,y) e^{i2\pi W(x,y)}$ называется *функция зрачка* и представляет собой просто комплексное число в круговой записи. Коэффициент передачи $T(x,y)$ это его модуль и функция $W(x,y)$ (в длинах волн) подразумевает фазу. $W(x,y)$ содержит aberrации, такие как турбулентность, защемление оптики, дефокусировка, астигматизм и т. д. Косинус в скобках представляет собой *наклонный коэффициент наклона*. Эта функция устранит нефизическое обратное распространение. Если разместить источник далеко, то $\theta_s \approx 0$ и потому $\theta_r \approx \theta$. Установить θ_r до 180° , как это было бы при обратном распространении, и коэффициент наклона исчезает.

При написании уравнения. Бл, неявно сделано еще одно приближение. Функция aberrации $W(x,y)$ незначительно влияет на углы в коэффициенте наклона, и уравнение нигде не содержит этого эффекта. Для всех практических целей это изменение угла чрезвычайно мало. Как правило,

²Модуль— абсолютное значение комплексного числа.

худшие наклоны волнового фронта в этой книге — это 30 длин волн более 100 мм, или около $0,01^\circ$. Уравнение VI также содержит предположение о линейности.

Ключевыми элементами формулы Френеля-Кирхгофа являются два фактора $e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}/r$ и $e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{c}}$ ($k' = 2\pi/\lambda$). Здесь принцип Гюйгенса о переизлучении элементарных точек записан в математической форме. Каждое из этих выражений представляет собой независимую от времени часть сферической волновой функции. Знаменатель приведет к тому, что интенсивность будет подчиняться закону обратных квадратов света (вдвое дальше, на одну четверть ярче). Числитель обеспечит правильное отображение зон Френеля на апертуре. "c" Сферическая волна представляет собой распространение волны от источника до точки на апертуре. Затем она возрождается как "r" сферическая волна, которая распространяется к точке приема.

Интенсивность связана с энергией, поэтому она не может быть комплексной. Он рассчитывается на основе поля выше следующим образом:

$$I(x',y') = U(x',y')U^*(x',y') = |U(x',y')|^2. \quad (\text{БИ } 2)$$

После того как интеграл выполнен по всей открытой апертуре, уравнение В.2 говорит, что интенсивность известна только *один пункт* в пространстве изображений. Чтобы найти его в любом другом месте, мы должны изменить значения x' и y' и снова вычислим интеграл поля. Чтобы полностью отобразить целое изображение таким способом, требуется (если не сказать больше) много времени.

Другое название выражения $I(x',y')$ это *функция разброса точек*, или ПСФ. PSF определяет, как дифракция, препятствия и аберрации превращают идеально острый точечный источник света в нечеткий диск. В случае идеальной оптики, фильтруемой только конечной круглой апертурой, PSF следует знакомой схеме диска Эйри.

Б.2 Приближения Фраунгофера и Френеля

Мы можем упростить уравнение. Бл, заметив некоторые симметрии и переведем задачу в другую систему координат. Сначала мы размещаем источник в удаленном месте на оси так, чтобы c — это очень большая константа. Тогда мы сможем вытащить $e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{c}}$ константу волновой функции из интеграла и спрятать ее в константе нормализации. Поскольку мы используем фокусирующую линзу или зеркало, мы притворяемся, что точка приема также находится очень далеко, «разгибая» волновой фронт (Борн и Вольф 1980, стр. 382-386). В приближении Фраунгофера (именно так называется это разгибание) важными величинами являются уже не расстояния, а внеосевые углы от центра апертуры до удаленного датчика.

Это приближение записывается как (Necht 1987, стр. 494)

$$T(\varphi_{Икс} \varphi_{Й}'' = \frac{1}{H} \iint_A T(Икс, Й) e^{i2\pi Икс \varphi_{Икс}} e^{i\pi \text{грех} \varphi_{Икс} + \text{грех} \varphi_{Й}} dx dy \quad (Б.3)$$

Хотя на первый взгляд это не выглядит намного проще, чем уравнение. Блин, приближение Фраунгофера покончило с этими очень запутанными расстояниями. $\rho(\varphi)$ или, по крайней мере, они теперь аккуратно спрятаны). Угол $\varphi_{Икс}$ это угол к точке изображения в Икс-направление, в то время как $\varphi_{Й}$ это угол к точке изображения в Й-направление. Вторая экспонента в подынтегральном выражении — это просто разность фаз, вызванная углом наклона вычисляемого местоположения изображения. Этот термин означает то же самое, что взять угол стола и спросить, насколько выше стол по всей поверхности. Над ногой, все еще касающейся пола, дополнительная высота равна нулю. В поднятом углу он имеет полную ценность. Везде над апертурой эту абберацию «наклона» можно легко вычислить. На все интересующие здесь случаи φ очень близко к φ , что делает это еще проще.

В приближении Фраунгофера фактор наклона не учитывается из-за очень малых отклонений волнового фронта от его сферически сходящейся траектории. H — новая константа нормализации.

Формула Фраунгофера не должна применяться к ненулевым значениям абберации дефокусировки. Однако следующий член разложения уравнения. V , использованный при выводе приближения Фраунгофера, и есть эта дефокусировка. Включение этого члена изменяет интеграл в приближении Френеля. Однако внешняя дефокусировка не может быть наложена на приближение Френеля — этот шаг будет вдвойне учитывать дефокусировку. Гораздо удобнее инкапсулировать все такие члены в функцию зрачка, которая затем применяется к скелетной формуле Фраунгофера.

Легкое прикосновение к небольшой степени расфокусировки, возможно, можно оценить по сдвигу фокуса в Таблице 5-1, разделенному на фокусное расстояние инструмента (которое соответствует дробному изменению сагитты волнового фронта). Например, при абберации дефокусировки на 12 длинах волн на 8-дюймовом (200 мм) телескопе с диафрагмой $f/6$ $\Delta z/\lambda = 0,0016$, очень маленькая доля.

Звездный тест сфокусированной апертуры не дает точных результатов на равных расстояниях внутри и снаружи фокуса, но разница невелика. Например, 200-мм телескоп с диафрагмой $f/6$, расфокусированный на 1,9 мм, указан в Таблице 5-1 как имеющий абберацию дефокусировки, равную 12 длинам волн. Тщательный расчет показывает, что внутренний фокус на расстоянии 1,9 мм имеет более точную абберацию, равную 12,02 длины волны. Снаружи равномерное движение окуляра приводит к дефокусирующей абберации на 11,98 длин волн. Если бы мы настроили фокусер до тех пор, пока абберация не составила бы ровно 12 длин волн, тогда изображение внутри фокуса было бы немного меньше и ярче, а изображение за пределами фокуса было бы постепенно больше и тусклее. Таким образом

Эффект проявляется в разнице увеличения. Возможно, если бы мы очень точно расфокусировали с помощью измерительного винта, мы едва смогли бы обнаружить такие изменения, но большинство звездных тестеров никогда не заметят разницы. Нам нужно просто добиться того, чтобы дробь $Дж/жмала$ (Бачинский и Бекефи, 1957; Ли, 1982; Эркила и Роджерс, 1981).

В.3 Расчет изображения для симметричных апертур

Дальнейшее упрощение приближения Фраунгофера приводит к тому, что функция зрачка кругосимметрична. Если интеграл в уравнении В.2 переписан в круговых координатах, можно выполнить угловой интеграл, чтобы получить

$$T_y(\rho'' = \rho) = \frac{1}{H\rho} \int_0^1 T(\rho) e^{i\alpha 2\pi V(\rho)} \rho J_0(\rho \rho_{\text{доктор}}' / f \lambda) d\rho, \quad (B.4)$$

где ρ — нормированная радиальная координата апертуры, ρ' — радиальная координата в фокальной плоскости, J_0 — функция Бесселя нулевого порядка, $\alpha H''$ — еще одна константа нормализации (Люнебург, 1964, стр. 345; Шредер, 1987, стр. 181-182).

В этой книге все кругово-симметричные изображения были рассчитаны с использованием этого упрощения. Конкретный используемый алгоритм разделил радиус на $H\rho$ равноотстоящие точки (обычно 300-500) и вычисляется сумма интенсивностей

$$I(\varphi'') = \frac{4}{H\rho} \left| \sum_{Дж=0}^H T_{Дж} e^{i\alpha 2\pi (V_{Тдж} + V_{Тд})} \left(\frac{Дж}{H\rho} \right) \left| \frac{Дж}{H\rho} \right| \right|^2. \quad (B.5)$$

Здесь значение φ'' это уменьшенный угол изображения $D\theta/\lambda$, где θ это истинный угол, D — диаметр апертуры, λ — длина волны. (Этот угол удобно достигает края диска Эйри для получения однородной круглой апертуры при 1,22.) $V_{Тд}$ это аберрация дефокусировки $A_2(Дж/H\rho)$ (определенные в главе 10) в длинах волн, и $V_{Тдж}$ содержит остальные аберрации. $T_{дж}$ это просто коэффициент передачи в выбранной радиальной точке $Дж$. $Дж$ рассчитывается с использованием подпрограммы, адаптированной из *Численные рецепты* (Нажимать и другие. 1986).

Также было несложно отслеживать окружающую энергию изображения, поскольку φ был увеличен. Поскольку уравнение В.5 представляет собой радиальную сумму, интенсивность внешних частей изображения должна быть взвешена по увеличенному периметру. Нормализованное приращение окружающей энергии составляет примерно

$$\Delta \mathcal{E}(\varphi) \approx \frac{\Delta \varphi \pi \varphi I(\varphi)}{2 \mathcal{E}_{TP}} \quad (B.6)$$

где $\Delta\varphi$ — это размер скачка в угле изображения и $\epsilon_{\text{стр}}$ — полная доля энергии, поступающая в систему. Если обструкция составляет 50%, $\epsilon_{\text{стр}}$ составляет 0,75, а окруженная энергия увеличивается настолько, что достигает единицы далеко за пределами диска Эйри.

На самом деле, если окружённая энергия накапливается простым способом (уравнения) В.6, результаты плохие. Энергия в сфокусированных изображениях резко возрастает, как только радиус круга начинает раскрываться. Допущенные здесь ошибки могут быть большими. В программе использовалась интеграция правил Симпсона со сложным стартером.

Передаточная функция модуляции (MTF) не рассчитывалась для кругово-симметричных апертур в более простой форме автокорреляции (см. ниже). Такой расчет слишком медленный. Вместо этого однажды $I(\varphi)$ была проведена далеко за пределами диска Эйри, ее можно было использовать для вывода передаточной функции. Изображение представляет собой просто свертку идеальной синусоидальной цели с функцией рассеяния точки. Для пространственной частоты v , интеграл равен (адаптировано из Schroeder 1987, стр. 104)

$$MOP(v) = \frac{1}{M_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{0.4} \mathcal{J}_0(2\pi v \rho) \rho d\rho d\varphi. \quad (B.7)$$

Номер M_0 является нормировкой на нулевой пространственной частоте.

Проблема с этим расчетом не очевидна при беглом осмотре. Верхний предел интеграла предполагает, что интенсивность известна до сколь угодно большого угла. Конечно, мы можем вычислить интенсивность для любого угла, но за пределами этого угла должна существовать энергия, о которой мы ничего не знаем. Высокие углы представлены очень низкими пространственными частотами. Таким образом, на первый взгляд может показаться, что эта энергия будет автоматически учтена путем принудительной нормировки M_0 в интеграле, оцененным $v=0$.

Такое приближение мешает работе. Передаточная функция модуляции, рассчитанная таким образом, имеет правильное значение (т. е. 1) на пространственной частоте 0, но на более высоких пространственных частотах рассчитанная передаточная функция оказывается слишком высокой. Неизбежный вывод состоит в том, что усечение угла приводит к численному уменьшению MTF на низких пространственных частотах. Другими словами, если мы не собрали эту удаленную энергию при расчете интенсивности, нам лучше не учитывать ее в уравнении. Б.7. Поэтому алгоритм вычислений несколько модифицируется:

$$MOP(v) = \frac{E(\varphi)_{\text{Макс}}}{MOP(0)_{M=0}} \sum_M \mathcal{J}_0(M) \left(\frac{M\varphi_{\text{Макс}}}{H_\varphi} \right) \left(\frac{2\pi M\varphi_{\text{Макс}}}{H_\varphi} \right). \quad (B.8)$$

Здесь $MTF(0)$ — это просто сумма, сделанная для $v=0$ и m — индекс суммирования. $E(\varphi_{\text{Макс}})$ — это дробная энергия в окружности, если считать интеграл функции рассеяния точки. H_φ — количество углов интенсивности

суммирование. Эффект на MTF заключается в создании небольшого нисходящего закручивания на низких пространственных частотах. На большинстве рисунков, представленных в этой книге, функция интенсивности выполнялась для углов, при которых нижняя часть MTF могла быть аппроксимирована прямой линией до известной точки пересечения единицы в начале координат. Обычно окружённая энергия под самым дальним углом сфокусированного узора превышала 99%.

Б.4 Расчет изображения для несимметричных апертур

Хотя полевые расчеты по уравнению В.4 длинные, они намного короче двойного интеграла, необходимого для несимметричной функции зрачка. Другие отмечали, что создание таких шаблонов утомительно (Оллред и Миллс, 1989); до того, как компьютерное время стало недорогим, их вообще не часто пытались использовать. Каждая апертура моделируется квадратной сеткой из 129×129 точек, при этом точки, находящиеся дальше 64 от центра, устанавливаются на ноль. В пределах апертуры находятся 12 853 точки. Плоскость изображения также представляет собой сетку 129×129 точек. Интеграл в уравнении В.3 необходимо выполнить для каждого из этих 16 641 местоположений изображений. Для каждого несимметричного кадра изображения в этой книге подынтегральное выражение уравнения. В.3 необходимо было оценить более 210 миллионов раз.

Плоскость изображения может быть нанесена на карту за один раз, используя другой метод. Если бы двумерное дискретное преобразование Фурье было взято из комплексной функции зрачка, результатом было бы (после перестановки и дальнейшей обработки) полное изображение. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) полезно для снижения вычислительной нагрузки (Бригам, 1988).

Эта процедура сама по себе требует значительных вычислений. В этой книге угол ϕ был отобран в $D\theta$ значения λ всего 0,05 или 0,1. Чтобы получить сетку с таким мелким интервалом, массив функций зрачка должен быть дополнен пробелами (заполнен нулями) до размеров 1024×1024 или 2048×2048 . Хранение только этого массива одинарной точности занимает от 8 до 32 мегабайт. Большая часть преимущества в скорости БПФ будет сведена на нет относительно медленным временем доступа к виртуальной памяти (большие размеры ОЗУ не были обычным явлением во время разработки этой программы). Одна компания-разработчик программного обеспечения предложила процедуру двумерного БПФ, которая могла преобразовать сложный массив 1024×1024 за несколько минут. Однако во время эталонного теста эта процедура не использовала диск в качестве виртуальной памяти; массив полностью хранился в быстрой электронной памяти.

После завершения расчета такого БПФ необходимо реорганизовать массив и извлечь интенсивность изображения. Все 8 мегабайт сохранять необязательно, но дополнительная обработка для выборки и сжатия изображения потребует больше компьютерного времени. В конце концов было решено, что дополнительные усилия, необходимые для обработки изображения путем простого интегрирования уравнения. Б.3 не был тяжелым бременем и с лихвой компенсировался полной прозрачностью

КОД.

Алгоритм, который использовался в основе программы, представлял собой дискретную версию Eqs. Б.2 и Б.3. Оно имело форму

$$Y_{M,N} = \frac{1}{H_2} \left| \sum_{T, T_{\text{BF}}=64}^{T_4} T e^{j\pi 2 T (B_{T, T_{\text{BF}}} + B_{T_d})} e^{j\pi \Phi_{\text{Макс}}(T \text{онна} + \text{ну}) / 64_2} \right|^2, \quad (Б.9)$$

где B_{T_d} это дефокусирующая aberrация, $B_d = A_2(T_2 + T_{\text{BF}}) / 64_2$ и ценности $B_{T, T_{\text{BF}}}$ содержат остальные aberrации. N это число ученических баллов, т. е. 12 853. Эта сумма выполняется для каждой точки изображения в сетке, которая управляет индексами. M от — 64 до 64.

Асимметричные зрачки имеют сложные передаточные функции. Полное описание характеристик асимметричных апертур называется *оптическая передаточная функция* (OTF) и имеет следующий вид:

$$OTF(v) = \text{МОП}(v) e^{j\psi(v)}. \quad (Б.10)$$

Мнимый показатель $\psi(v)$ это *фазовая передаточная функция*. Для небольших aberrаций действительная часть OTF намного больше мнимой. Таким образом, фазой обычно пренебрегают. Модуль $MTF(v)$ — величина, обычно приравняваемая к оптическому качеству системы.

Эффект небольшой воображаемой части OTF на изображение гистограммы заключается в небольшом смещении его в сторону, но недостаточном для полного его изменения. Разворот адекватно обрабатывается отрицательным MTF.³

Очевидно, что мы не можем использовать циркулярно-симметричную формулировку уравнения. Б.7 для расчета OTF асимметричного зрачка. Вместо этого мы можем использовать аккуратную формулировку, хорошо описанную во многих местах (Борн и Вольф 1980, стр. 485; Паррент и Томпсон 1969, стр. 22; Люнебург 1964, стр. 356). OTF рассчитывается как автокорреляция функции зрачка:

$$OTF(v_{\text{Икс}}, v_{\text{Й}}) = \frac{\iint \pi(\text{Икс}, \text{Й}) \pi^*(\text{Икс} - 2v_{\text{Икс}}, \text{Й} - 2v_{\text{Й}}) dx dy}{\iint |\pi(\text{Икс}, \text{Й})|^2 dx dy}, \quad (Б.11)$$

где интеграл берется по плоскости апертуры. Здесь π — это сокращенное обозначение функции зрачка, определенной в тексте после уравнения. v Координаты апертуры определяются так, чтобы периметр находился на $\text{Икс}^2 + \text{Й}^2 = 1$, и аналогичным образом нормируются доли пространственных частот. Можно представить приведенный выше интеграл как перекрытие между функцией зрачка и функцией зрачка, сдвинутой вбок на доли пространственной частоты, как показано на рис. В-2. Для неаберрированных зрачков OTF представляет собой темную область, разделенную на непокрытую площадь всей апертуры.

³MTF, как определено в уравнении. В.10 всегда положителен, но знаковая составляющая функции фазового переноса иногда добавляется к MTF, когда OTF в основном действительна. Полученный «MTF» более плавный и больше говорит об оптических характеристиках.

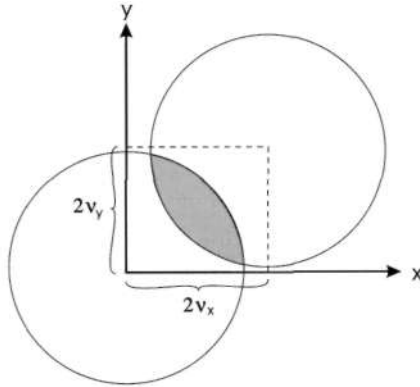


Рис. Б-2. МОГ как перекрытие со смещенным зрачком.

Реальный алгоритм учитывал выборку апертуры по прямоугольной сетке. Поскольку смещения должны приземляться в выбранных позициях, ОТФ рассчитывался только для целочисленных смещений вдоль *Икс* и направлений и смещении на 45° с равными смещениями. Алгоритм сдвига только *Икс* направление было

$$ОТФ(V_{ИКС}'' = '') = \frac{\sum_{T''=0}^{64} \sum_{T_{ЫФ}=-64}^{64} T_{ЫФ} e^{i 2\pi W_{ЫФ} T_{Т-С, ТЫ}} e^{-i 2\pi W_{Т-С, ТЫ}}}{\sum_{T, ТЫФ=-64}^{64} T_{ЫФ}} \quad (Б.12)$$

где индексы (для «смены»), *Ты*, песок тробег от -64 до 64 и $V_{ИКС}'' = (с+64)/128$. Максимальная пространственная частота соответствует $V_{ИКС}'' = 1$. Здесь массив зрачков измеряется от его центра.

Окруженную энергию можно определить для асимметричной апертуры, но в этой книге такие расчеты не приводятся.

Б.5 Программы

Б.5.1 Симметричная функция зрачка

Если зрачок можно было описать фигурой вращения как по амплитуде, так и по фазе, то дифракционные картины рассчитывались с помощью автономной программы. АПЕРТУРА. Эта программа позволяет пользователю указать как передачу, так и aberrацию в зависимости от радиуса. После выбора значения aberrации дефокусировки АПЕРТУРА вычисляет функцию рассеяния точки (PSF) и окружающую энергию. Как только PSF будет рассчитан достаточно далеко от центрального дифракционного диска, можно сгенерировать передаточную функцию модуляции.

АПЕРТУРА относительно быстро. Если радиус разделить на 300 точек выборки, он может выполнить 200 вычислений, составляющих типичный сфокусированный PSF, менее чем за минуту, используя 25 МГц 386/7. Затем изображение отображается в оттенках серого на экране VGA.

На этом этапе другая программа, ПОСТДР, можно вызвать. ПОСТДР преобразует файл интенсивности в полутоновое изображение размером 128×128 , используя язык описания страниц PostScript™. ПОСТДР позволяет регулировать контрастность и яркость изображения в соответствии с ограниченным динамическим диапазоном бумаги для печати.

В.5.2 Асимметричная функция зрачка

Структура программы разделена на две задачи. Первая программа, УЧЕНИК, генерирует функцию начинающего ученика. Обычно этот файл функции зрачка рассчитывается для представления сфокусированного и беспрепятственного телескопа. Он также имеет стандартное значение аберрации, например среднеквадратичное значение для λ длины волны. Затем этот файл передается в программу дифракционной картины. АСИММ.К функции зрачка применяется дополнительное препятствие и расфокусировка, а также множитель аберрации. АСИММ затем генерирует файл интенсивности изображения.

Потому что АСИММ был разработан для утомительного прямого интегрирования уравнения. В.3, он был написан с помощью 32-битного оптимизирующего компилятора FORTRAN и во время выполнения использует расширитель DOS. Он работает за 9,6 часа на 25 МГц 386/7 и 2,3 часа на 486DX50.⁴

Передаточная функция модуляции рассчитывается из файла функции зрачка с использованием отдельной процедуры под названием MTF. Он генерирует файл с OTF трех направлений баров последовательно. MTF легко выводится из этих комплексных значений.

Продольные структуры срезов в фокусе рассчитываются с вариацией АСИММ.

В.6 Верификация численной процедуры

Как и следовало ожидать, реальная реализация алгоритмов очень запутана по сравнению с скудным представлением выше. Для проверки правильности выполнения кодирования использовались три метода:

1. Проверки между АПЕРТУРА и АСИММ для круглосимметричных проемов,
2. Сравнение с точной процедурой и
3. Воспроизведение сложных узоров, встречающихся в литературе. _____

⁴АСИММ фрагментирован и требует большого опыта для надежного выполнения. Чтобы его могли использовать обычные пользователи, потребуется значительная переработка. Оно не будет выпущено.

В.6.1 Сравнение АПЕРТУРАиАСИММ

Для создания дифрактограмм в симметричной и асимметричной программах использовались две разные процедуры. Несмотря на то, что обе программы имеют родословную, восходящую к формуле В.3, между ними легко заметить очень небольшое сходство. Они используют разные процедуры и написаны на разных языках. Мы можем рассчитать одни и те же ситуации, используя эти две отдельные процедуры, и убедиться, что ответы действительно одинаковы.

Берем кругово-симметричный зрачок и запускаем его через программу медленной прямой интеграции АСИММ, следует получить тот же ответ, что и АПЕРТУРА делает. Тесты были проведены для ряда учеников, и в результате были получены хорошие результаты сравнения. Два таких изображения показаны на рис. В-3; функции рассеяния точки показаны на рис. В-4.

Изображения практически идентичны, за исключением небольшого азимутального структурирования АСИММ выход. Возможная причина такого различия изображений обсуждается ниже, в разделе В.8.

Если бы эти программы генерировали совершенно разные шаблоны, мы бы не знали, верны ли они. Но поскольку две совершенно разные процедуры генерируют один и тот же ответ, они либо закодированы правильно, либо произошла маловероятная авария — ошибка, которая одинаково проявляется в обеих процедурах. Не имея доказательств обратного, мы будем считать, что они верны на данный момент, и приступим к другим проверкам.

Эта проверка не поддерживает исходную теорию, содержащуюся в уравнении В.3. Это просто говорит о том, что программы, похоже, вычисляют уравнение В.3 правильно. Частичное подтверждение теории получено экспериментально, но дифракционные картины от реальных апертур чрезвычайно компактны. Следовательно, их яркость трудно измерить количественно (Тейлор и Томпсон, 1958, Берч, 1985).

В.6.2 Численное сравнение с аналитическим решением

Любая численная процедура должна воспроизводить простые системы, для которых ответ известен аналитически. К сожалению, лишь немногие задачи дифракции решены в закрытой форме. С нашей точки зрения, аналитическая теория круглого отверстия, содержащая хотя бы одну абберацию, была бы приемлемой.

Решение проблемы идеальной круглой апертуры с абберацией дефокусировки можно найти в главе 8 книги «Борн и Вольф». Оно включает в себя так называемые *Функции Ломмеля* чтобы выполнить версию интеграла в уравнении В.4

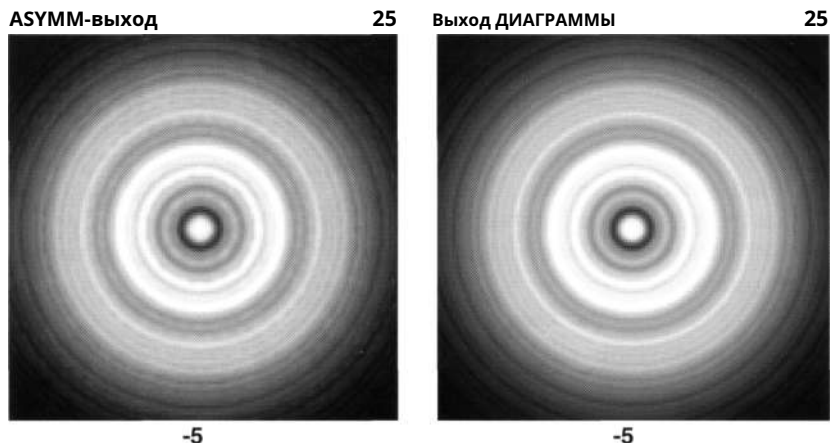


Рис. Б-3. Сравнительные изображения АПЕРТУРА и АСИММ + ¼-волновая сферическая aberrация при закрытии зрачка на 25%.

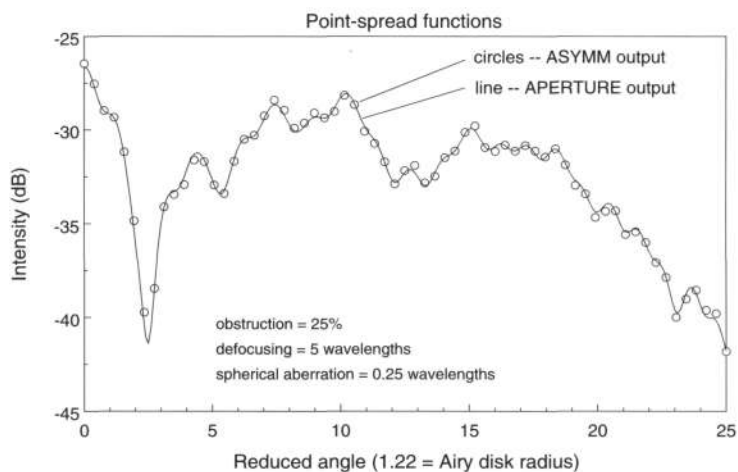


Рис. Б-4. Функции распределения точек, которые использовались для создания предыдущей фигуры по одному радиусу.

(Борн и Вольф, 1980, стр. 438-439). Каждое из двух решений записывается как бесконечный ряд, имеющий свою собственную область применимости: одно внутри геометрической тени, а другое вне ее. Эти серии были запрограммированы в документ MathCad™, и каждая из них была отображена в виде графика в той области, где она должна была работать (не показано). Результаты были неотличимы от результатов АПЕРТУРА. Испытания проводились до 12 длин волн, дефокусирующих aberrацию.

рационе и были ограничены функциями Бесселя до порядка 80.

И снова эта проверка обнадеживает, но неполна. Он проверяет дефокусирующий компонент функции абберации (который появляется в отдельном термине обоих алгоритмов), но оставляет другие абберации в покое. Однако центральные петли АСИММиАПЕРТУРАне различают дефокусировку и другие абберации. Если бы была допущена ошибка, то она должна была бы быть в подготовительных положениях обеих программ. Более того, любая предполагаемая ошибка должна была бы оставить абберацию дефокусировки незапятнанной в обеих процедурах.

В.6.3 Сравнение с опубликованными образцами

Возможно, самой серьезной проверкой аппроксимации здесь было сравнение закономерностей, сгенерированныхАСИММс опубликованными контурными графиками комы и астигматизма. Контурные графики комы были аналитически построены Р. Кингсликом (1948), но чаще всего они доступны в виде переизданий в Born and Wolf (6-е изд., 1980). Контурный график астигматизма был опубликован Ниенхейсом и Нейбуром (1949).

Выражения для абберации несколько отличаются от первичных аббераций, используемых для построения этих контурных графиков, но если мы проследим детали, мы обнаружим, что 3,2 и 6,4 длины волн первичной комы преобразуются в 2,13 и 4,27 длины волны абберации комы от пика до долины как определяется в дифракционном фокусе Цернике. Другими словами, кома, как она определена здесь, – это $2/\alpha$ коэффициент, фигурирующий в книге Борн и Вольф. Аналогичным образом, использованная там величина астигматизма составляла 0,64 длины волны, что соответствует 1,28 длины волны астигматизма от пика до впадины. Узоры, нарисованныеАСИММ показаны на рис. В-5. Они очень хорошо соответствуют общей форме контурных графиков (оси были переименованы в Born and Wolf, стр. 478, 480).

В.7 Числовые ограничения программ

ХотяАПЕРТУРАтакже является численной моделью, этоАСИММкоторый имеет наибольшую вероятность потерпеть неудачу. Опыт показал, что 129 точек на диаметре апертуры с трудом моделируют абберацию дефокусировки, превышающую 10 длин волн. По каждому диаметру в таких условиях в зоне Френеля находится минимум около 5 образцов. Ошибки имеют шанс усредниться до нуля только потому, что многие такие диаметры складываются статистически.

АСИММимитирует апертуру с приблизительным круговым узором радиусом 64 точки. Эти точки распределены по прямоугольной схеме. Край такой выборочной апертуры обязательно неровный. Мы можем, возможно,

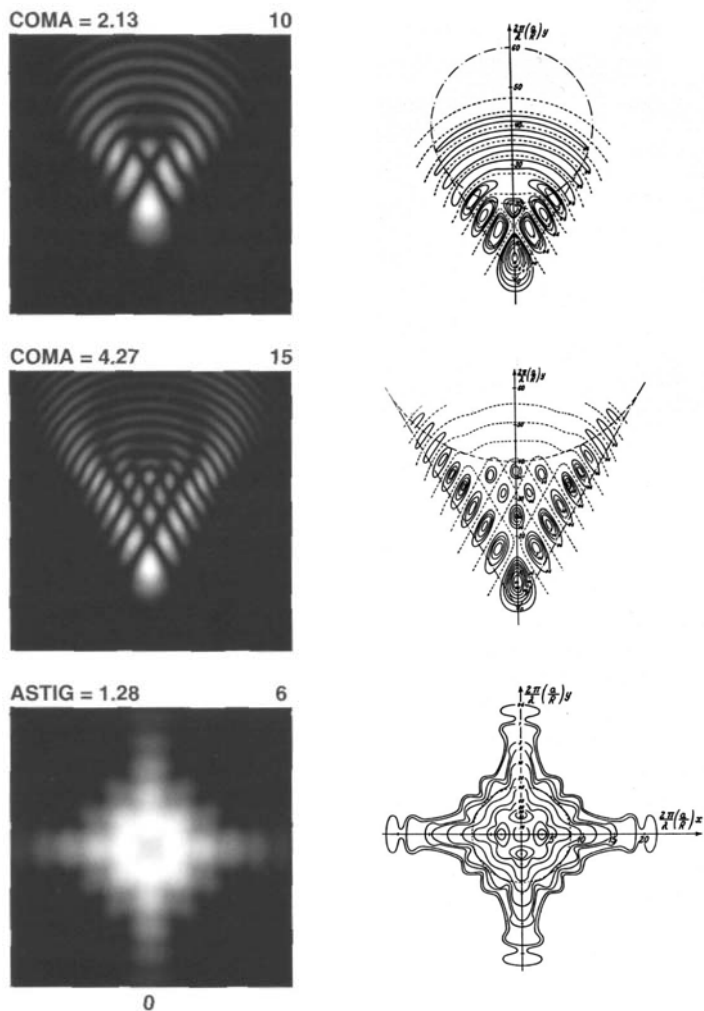


Рис. Б-5. Воспроизведение изображений комы и астигматизма. Левые изображения не в том же масштабе как контурные графики справа. (Контурные комы опубликованы с разрешения Р. Кингслика, а контур астигматизма любезно предоставлен издательством Elsevier Science Publishing.)

оцените, какая ошибка возникает, проверив рис. В-6, на котором показаны различия между АПЕРТУРА и АСИММна расфокусированной неаберрированной диафрагме расширяется до тех пор, пока ошибки не станут очевидны. Потому что АПЕРТУРА можно настроить для суммирования по более мелкой одномерной сетке (здесь это 500 точек), этого достаточно.

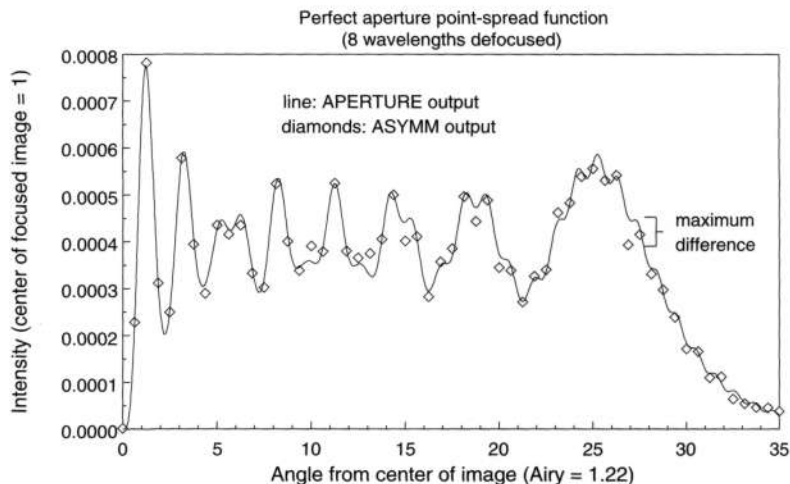


Рис. Б-6. Ограниченные ошибки размера выборки АСИММ.

предполагает меньше коррозии. Модель имеет гладкие края. АПЕРТУРА потому что угловой интеграл вычисляется аналитически.

Максимальная разница составляет около 0,000075, или 1 часть из 13 300. Таким образом, мы видим менее 1 ошибочной выборки из 12 853 точек на апертуре, вносящих вклад в интенсивность.

Задумайтесь на мгновение о том, как работают эти неровные края. Если точка находится дальше от центра, чем радиус единицы, модель игнорирует ее. Каждая точка представляет собой квадратную область вокруг своих ног. Таким образом, если этот маленький хвост находится более чем на полпути за пределами радиуса, его вклад пренебрегают. Если он выходит за границу менее чем на половину, его вклад засчитывается полностью, даже для области, выходящей за пределы. $A/13\,000$ ошибка — это очень маленькая ошибка, и, возможно, она лучше, чем заслуживает программа. Можно предположить, что время от времени возникают ошибки размером до 4 частей из 13 000. Такая ошибка составит 0,0003 или -35 дБ. Поскольку эта интенсивность примерно равна интенсивности изображения, расфокусированного на 9 длин волн, мы должны ожидать, что точность за пределами значений дефокусировки от 8 до 10 длин волн снизится.

В практическом использовании, АСИММ не провалился из-за неровных краев зрачка. На рисунке В-7 показано сравнение двух идеальных изображений, каждое из которых расфокусировано на 8 длин волн. Один был произведен с АСИММ и другой с АПЕРТУРА. Оба изображения были напечатаны с чрезвычайно низким контрастом, чтобы подчеркнуть перистый вид, создаваемый грубыми краями. АСИММ — чужеродный. Эта ложная деталь была намного тусклее, чем -35 дБ. Во всех реальных случаях контраст был достаточно высоким, поэтому морщины были практически незаметны.

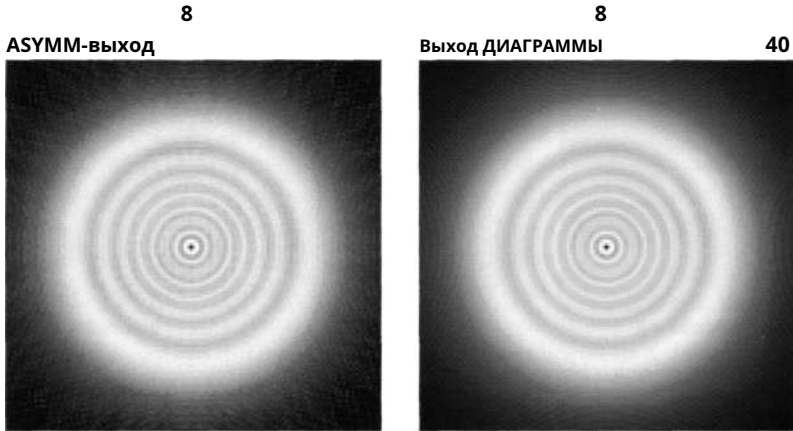


Рис. Б-7. Образцы изображений с чрезвычайно низкой контрастностью, показывающие мельчайшие ошибки в АСИММ-расчет.

Последняя проблема с редко выбранным зрачком ASYMM — это интерференция на решетке. Если фазовый сдвиг между соседними участвующими элементами составляет одну длину волны, они снова действуют так, как если бы они находились в фазе. Для нашего зрачка диаметром 128 точек это условие возникает при $D\theta\lambda = 128$.

Этот эффект является результатом предположения, что чудесно гладкая поверхность может быть представлена квадратной сеткой точек размером 129×129 . В терминологии БПФ мы можем назвать такое явление «алиасингом». Это эффект замены непрерывного преобразования Фурье на дискретно-выборочное.

Если мы не расфокусировались достаточно далеко, чтобы отвлечь значительный свет на отдаленные части пространства изображения, проблем не возникнет. Другими словами, изображение и двойное изображение (при уменьшенном угле 128) не мешают, потому что они не излучают много света так далеко от своих центров. Тем не менее, существует предел того, насколько изображение может быть расфокусировано до тех пор, пока помехи не станут серьезными. Мы должны знать этот предел, чтобы его можно было разумно обойти.

На рис. В-8 показан шаблон, $D\theta\lambda = 128$ для трех случаев: aberrации дефокусировки 8, 12 и 16 длин волн. Понятно, что 16 длин волн — это слишком далеко, а 12 — сомнительно из-за темно-серых завитков между изображениями. Только кадр, изображающий 8 длин волн, кажется, показывает, что дифракционные диски действительно изолированы.

Мы должны ожидать, что изображения будут свободны от интерференции только в том случае, если мы сможем поместить целый расфокусированный диск в темноту между изображениями. Геометрический радиус изображения в уменьшенном ракурсе в 4 раза превышает число длин волн дефокусировки. Этот результат может быть получен путем рассмотрения уравнения. 5.1,

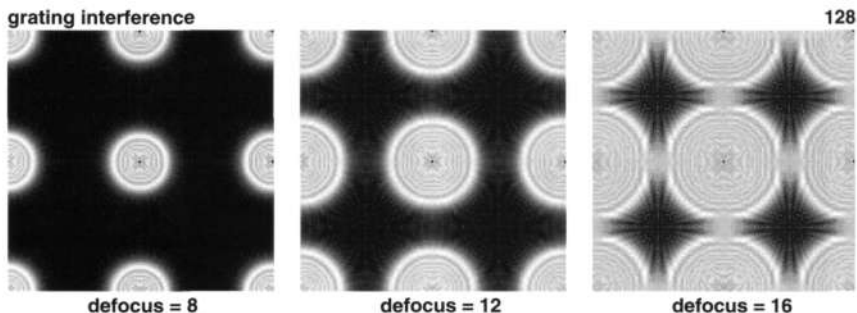


Рис. Б-8. Помехи между изображениями бокового порядка вАСИММ. Обратите внимание, что приведенный угол очень велик и составляет 128°.

$$\phi\phi' = 8F_2\Delta n\lambda,$$

где ϕ — фокусное соотношение и Δn — число длин волн фокусирующей разности. Мы можем вычислить геометрический радиус изображения:

$$\text{радиус} = \frac{(D/2)(j-j')}{j} = \frac{j-j'}{2\phi} = \frac{8F_2\Delta n\lambda}{2\phi} = 4\Delta n F\lambda. \quad (\text{Б.13})$$

Поскольку радиус диска Эйри равен $1,22F\lambda$, мы можем определить ϕ как коэффициент преобразования приведенного угла в радиус. Таким образом, $4\Delta n$ — значение приведенного угла на краю геометрической тени. В данном случае aberrация дефокусировки на 8 длин волн означает, что геометрическая тень начинается под уменьшенным углом $4 \times 8 = 32$, или в 26,2 раза больше радиуса диска Эйри.

Восьми длин волн должно быть едва достаточно, чтобы поместить весь диск между диском и интерференционным порядком, центрированным под уменьшенным углом 128. В центре и на краю появится геометрический радиус с диаметром в середине: $32 + 64 + 32 = 128$. Конечно, изображение кажется несколько меньшим геометрического радиуса. Целый диск падал между ними с легким грохотом.

Изредка АСИММ попросили рассчитать изображение, расфокусированное на 10 длин волн. В некоторых случаях было заметно вмешательство бортового приказа, но ущерб не был серьезным.

Все диаграммы с aberrацией дефокусировки за пределами 10 длин волн рассчитывались только с помощью программы АПЕРТУРА, который гораздо менее чувствителен к ошибке выборки.

Б.8 Трудности при печати

Динамический диапазон воспроизведения книг далеко не такой же, как динамический диапазон человеческого глаза. Когда глаз получает неправильный свет

уровень, он регулируется. Бумага этого сделать не может. Процесс полутонов делит шкалы серого на точечные узоры. Идеальный динамический диапазон для такого процесса позволяет использовать шкалу серого с 256 уровнями интенсивности.⁵

Очевидно, что наиболее желательным способом было бы использовать неизменный масштаб для процесса печати. Эта процедура невозможна только при наличии 256 уровней. Выше мы видели, что много интересных деталей появляется при интенсивности 0,0001, особенно при больших значениях абберации дефокусировки. Таким образом, ни одна единая шкала не может охватывать как сфокусированные изображения (интенсивность = 1), так и расфокусированные изображения (интенсивность = 1) $\approx 0,0001$). Нам понадобится шкала серого с 10 000 уровнями интенсивности. Кроме того, самосветящееся и отражающее изображение имеют тонкие различия. Настоящие звезды рассматриваются в темном поле, а переменная чувствительность глаза отслеживает пониженную интенсивность расфокусированного изображения. Изображения на бумаге должны быть освещены лампой. Когда бумажные изображения темнеют, глаз не следит за ними. Яркие углы бумаги все еще находятся в поле зрения, а дополнительное освещение мешает отслеживанию.

К этой проблеме добавляются нелинейности, связанные с печатью. Часто темный конец шкалы оказывается темнее, чем ожидалось, из-за механизма распространения чернильных пятен. Самые яркие части изображения слишком яркие, потому что очень маленькие изолированные точки вообще не впитывают чернила. Конечным результатом является увеличение контрастности и уменьшение динамического диапазона.

У нас нет другого выбора, кроме как произвольно следовать уменьшенному диапазону примерно линейного масштаба печати. На изображениях в этой книге яркость кадра значительно различается. Сфокусированные изображения компактны; кажется, что они нарисованы всего лишь пятном белого цвета. С другой стороны, расфокусированные изображения кажутся намного ярче, чем они кажутся на самом деле при просмотре в телескоп. И контрастность, и яркость находятся под субъективным контролем.

Когда вы смотрите на любое изображение в этой книге, сосредоточьтесь на форме, а не на абсолютной яркости. Освещенность такого изображения — наименее значимое (и самое обманчивое) из его свойств.

⁵Лазерные принтеры с разрешением 300 точек на дюйм теоретически ограничены 30 различными оттенками, если они используют

⁵56-дюймовая растровая сетка. Большинство из них на практике достигают половины этого показателя.

Приложение С

Вывод вспомогательной оси и смещения

Ральф Дакин опубликовал точные выражения для малой оси и смещения в *Небо и телескоплет* назад, но эти выражения устроены для удобства вычислений, а не для объяснения. Следовательно, уравнения немного загадочны и могут содержать ошибки при публикации во вторичных источниках. Этой ситуации не помогла досадная опечатка в оригинальной статье. Ошибка была исправлена через несколько месяцев, но исправление часто упускалось, и неправильные выражения получили дальнейшее развитие в любительской литературе (Дакин 1962, *опечатка* 1963).

Эти величины вывести несложно, и кое-что можно узнать, рассматривая логику аналитической геометрии, поэтому здесь они выводятся заново. Следующие ниже формулы внешне отличаются от выражений Дакина, но дают те же ответы. Различия, вероятно, вызваны способом настройки систем координат. Такие модификации часто приводят к якобы другим формулам.

С.1 Вывод

На рисунке С-1 показан «развернутый» ньютоновский закон и определены различные величины, полезные для этого вывода. Эти переменные: f , фокусное расстояние; D , диаметр зеркала; s , сагитта (или глубина) зеркала; T , расстояние от фокальной плоскости до центра трубки; il , диаметр полностью освещенной области в фокальной плоскости. В этом выводе я определю значения малой (короткой) оси диагонали и смещение ее центра вбок или вниз. Система координат определяется так, что ее начало находится в центре фокальной плоскости. *Икс*-ось проходит через центр зеркала, *ай*-ось проходит вбок от оптической оси.

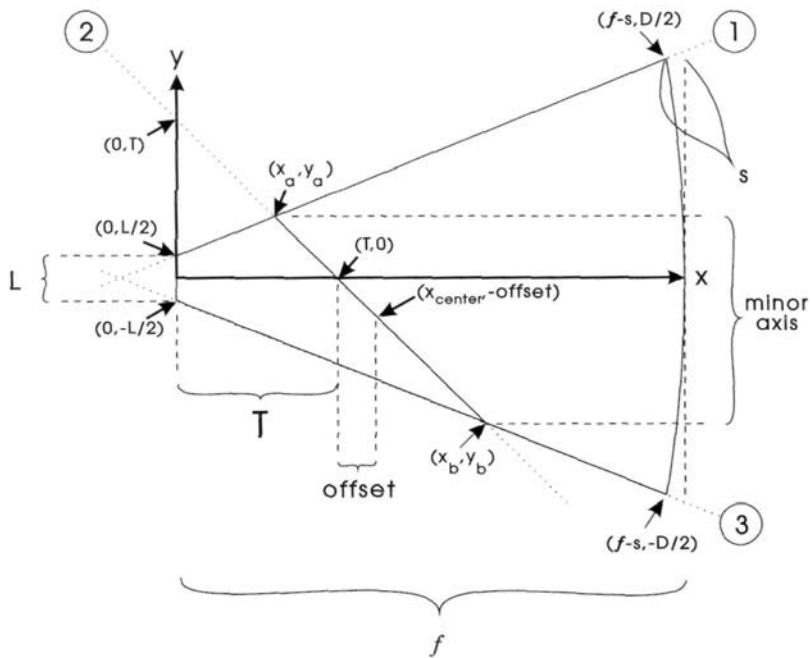


Рис. кл. Система координат и количества представляет интерес в определении размера и правильном размещении ньютоновской диагонали.

Три линии на рис. С-1 имеют важное значение. Линии №1 и №3 следуют по краям полностью освещенного поля к краям зеркала. Линия №2 направлена вдоль поверхности диагонали. Мы знаем, что он находится под углом 45° и, следовательно, ударяет по двум осям в указанные точки, имеющие координаты $(0, T)$ и $(T, 0)$. Точно так же мы знаем координаты двух точек вдоль каждой из линий №1 и №3, и мы также можем использовать эти знания для получения определяющего уравнения этих линий.

Зная уравнения линий, можно вычислить точки пересечения на дальних краях диагонали. Эти пересечения имеют координаты $(Икс_a, да_м)$ и $(Икс_b, да_б)$. Эти точки — все, что требуется для получения как вспомогательной оси, так и смещения. Малая ось — это

$$MA = y_a - y_b, \quad (C.1)$$

и смещение

$$\text{Компенсировать} = \frac{Икс_a + Икс_b - T}{2} \quad (C.2)$$

Линии имеют общий вид $y = mx + b$, где b — это y -перехват и m — это наклон. Линию № 2 определить легче всего, и ее можно проверить путем проверки.

можно приписать ему уравнение

$$y_2'' = IKC_2 + T. \tag{C.3}$$

В строке №1 есть y -перехват $L/2$, а наклон можно получить, подставив известные координаты точки в верхнем углу зеркала:

$$\frac{D}{2} = M_1(x-c) + \frac{L}{2} \tag{C.4}$$

Таким образом,

$$y_1'' = \frac{D-L}{2(x-c)} IKC_2 + \frac{L}{2}$$

Аналогично, уравнение линии №3 принимает вид

$$y_3 = -\frac{D-L}{2(x-c)} IKC_2 + \frac{L}{2} \tag{C.5}$$

Мы можем переименовать количество $(D-L)/2(e-s) \equiv n$. Все три уравнения можно резюмировать как

$$y_1'' = n x_1 + \frac{L}{2}, \quad y_2 = -IKC_2 + T, \quad y_3'' = -n x_3 - \frac{L}{2} \tag{C.6}$$

Установив $y_1 = y_2$, мы можем определить координату IKC_2 как

$$IKC_2 = \frac{T - (L/2)}{1+n} \tag{C.7}$$

и мы вставляем это выражение обратно в уравнение строки №2, чтобы получить y_2 :

$$y_2 = -\frac{T - (L/2)}{1+n} + T. \tag{C.8}$$

Аналогично координаты другой точки пересечения равны

$$IKC_2 = \frac{T + (L/2)}{1-n} \quad \text{и} \quad y_6 = -\frac{T + (L/2)}{1-n} + T. \tag{C.9}$$

Выражение для малой оси (уравнение С.1) представляет собой просто разницу между двумя y -ценности:

$$MA'' = \frac{T + (L/2)}{1-n} - \frac{T - (L/2)}{1+n} \quad \text{или} \quad MA'' = \frac{L+2nT}{1-n^2} \tag{K.10}$$

Смещение (уравнение С.2) немного сложнее:

$$\text{Компенсировать} \left(\frac{1}{2} \left[\frac{T - (L/2)}{1+n} + \frac{T + (L/2)}{1-n} \right] \right) - T \quad \text{или} \quad \text{Компенсировать} \left(\frac{T + (\text{Нидерланды}/2)}{1-n^2} \right) - T. \tag{C.11}$$

Окончательные выражения уравнений С.10 и С.11 являются точными. Им требуется только выражение сагитты. Парабола фокусажопределяется уравнением $x = f - (y^2/4e)$, и точная сагитта получается путем оценки сдвига в Икса оси и значение у края, $D/2$:

$$c'' = \frac{D^2}{16ж} \quad (К.12)$$

Обратите внимание, что уравнение. С.12 — это не то же самое, что сагитта волнового фронта, которая будет рассчитана в Приложении Е, а сагитта поверхности, которая вдвое меньше.

С.2 Тестовый пример

Прежде чем двигаться дальше, было бы разумно сверить эти выражения с результатами Дакина. Один из таких расчетов приведен в Приложении G Texereau (1984). С

$$\begin{aligned} c &= 0,0833333 \text{ дюйма, } p \\ &= 0,0789913 \text{ дюймов, } T \\ &= 6,3 \text{ дюйма и } L = 0,43 \\ &\text{дюйма,} \end{aligned}$$

легко подсчитать (из уравнения С.10), что $MA = 1,43423950$ дюймов. Это число хорошо сопоставимо с результатом 1,43423955, полученным с использованием формул Дакина, перепечатанных в Тексеро. Смещение = 0,056646217 дюймов там и 0,056646220 здесь. Небольшие различия вызваны числовой ошибкой усечения. (Для сравнения расчеты в Тексеро проводились с точностью до десятичных знаков.)

С.3 Приближения

Почти точные выражения не так уж и сложно вычислить при наличии обычных калькуляторов и компьютеров. Программы для работы с электронными таблицами особенно удобны для подобных вычислений, но некоторым людям может потребоваться более компактная форма аппроксимации.

Обратите внимание, что в уравнениях. С.10 и С.11 коэффициент $1/(1 - n_2)$ можно аппроксимировать $1 + n_2$. Для большинства зеркал количество $(D-L)/2(e - s) \cong$ очень близко к $(D-L)/2\phi$. Капитал Фэто фокусное соотношение, поэтому

$$\text{Компенсировать} = \frac{T + (\text{Нидерланды } 2)}{1 - n_2} - T \cong T + \text{Нидерланды } 2 (1 + n_2 \dots) - T \cong \frac{T}{4\phi_2} + \left| \frac{1}{4\phi} \right| \frac{2T}{ж}, \quad (С.13)$$

где наименьшие члены были проигнорированы.

То же самое разложение можно было бы сделать и с уравнением для МА, снова игнорируя исключительно мелкие члены, чтобы получить ответ

$$MA \approx \lambda + \left(\frac{D - \lambda}{\lambda} \right) \parallel T. \quad (K.14)$$

Приведенный выше тестовый пример был пересчитан с помощью уравнений С.13 и С.14, и ответы: МА = 1,424 дюйма и Offset = 0,057 дюйма, что очень близко к точным цифрам. Конечно, при очень маленькой, полностью освещенной области фокальной плоскости эти значения приближаются к МА = T/λи смещение = T/4Ф₂.

Приложение Д

Маркировка дифракционных картин

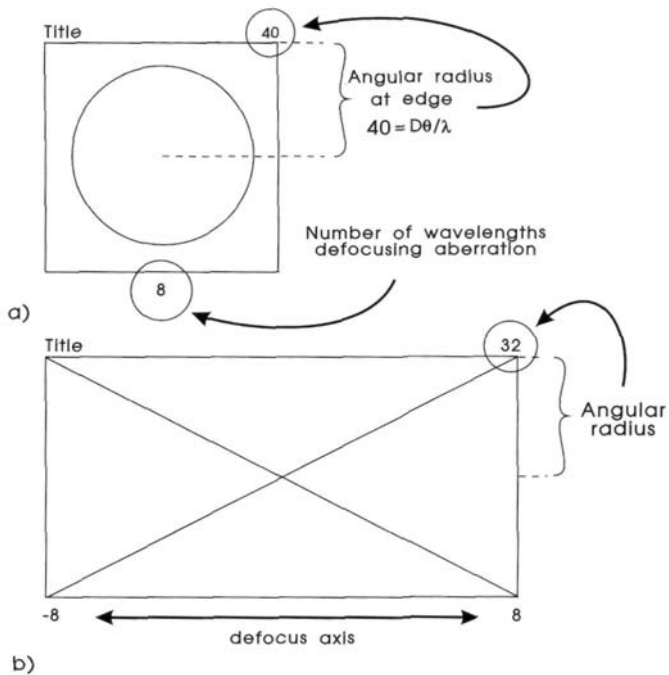


Рис. Д-1. Обозначения изображений: а) метки, используемые на дифрактограммах, б) метки, использованные на картинах продольных срезов.

На рисунке D-1a показано, как маркируется типичный шаблон изображения, представленный в этой книге, а на рисунке D-1b показаны небольшие изменения в аннотировании шаблонов срезов. В левом верхнем углу любого шаблона находится название, если оно имеется. В правом верхнем углу кадра находится число, обозначающее уменьшенный угловой радиус. $D\theta/\lambda$ от края до центра квадратного ящика.

В случае квадратной рамки дифракционной картины этот угол также относится к горизонтальной оси. Если бы шаблон имел здесь номер 1,22, диск Эйри сфокусированной идеальной апертуры просто находился бы внутри ящика (см. Рис. D-2). Большинство сфокусированных шаблонов в тексте имеют предел в 5 или 10, что позволяет нам рассмотреть как кольцевую структуру, так и центральное пятно. Расфокусированные узоры просматриваются при меньшем увеличении, что объясняет появление больших чисел в верхних правых углах.

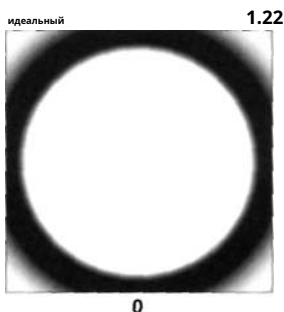


Рис. D-2.A. Идеальный диск Эйри едва помещается в коробке сауменьшен угловой размер 1,22 от центра к краю. Светлые углы – это первое дифракционное кольцо.

Центральное число внизу одного из квадратов — это количество длин волн дефокусирующей аберрации. Числа в нижних углах шаблона срезов обозначают значение расфокусировки на каждом конце прямоугольника, причем расфокусировка между ними постоянно меняется. Кадры продольных срезов расфокусированы на одинаковом расстоянии внутри и снаружи фокуса, при этом лучший фокус находится ближе к центру. Во всех кадрах срезов объектив или зеркало расположены слева.

В некоторых случаях беспорядок можно уменьшить, помечая только один кадр в строке или столбце. Если значение расфокусировки отсутствует, оно отображается внизу столбца. Если угловая координата отсутствует в конкретном кадре, ее можно найти в строке в крайнем правом углу.

Для составных фигур, в которых сфокусированный кадр изображения находится между двумя нижними столбцами, *внутри* поведения фокуса — это столбец слева (отрицательные значения расфокусировки), *снаружи* фокусное поведение (положительное) находится в среднем столбце. Такие фигуры имеют поведение идеальной оптики в крайнем правом столбце. Эти неаберрированные колонны фокусируют внимание только на одной стороне; другая сторона идентична. См. рис. В-3.

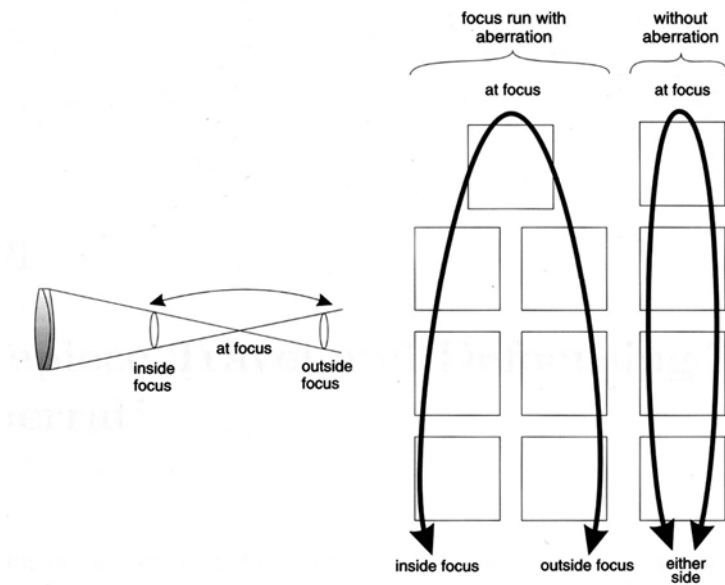


Рис. D-3. Шаблон фокусировки показывает, как кадры «загибаются» над областью фокуса. Идеальный шаблон справа не обязательно должен показывать изображения как внутри, так и снаружи фокуса, поскольку они идентичны.

Приложение Е

Ход окуляра и абберация дефокусировки

В этой книге используется общая единица абберации дефокусировки, когда речь идет о расстоянии от фокуса. Однако наиболее удобно рассматривать расфокусировку с точки зрения перемещения окуляра. Здесь мы хотим определить величину разницы между двумя сферами в апертуре, одна из которых сосредоточена в фокусе, а другой центрирован в положении расфокусировки. Затем мы соотнесем это очень маленькое расстояние в апертуре (абберацию дефокусировки) с относительно большим расстоянием, на которое мы переместили окуляр между ними. Эта ситуация изображена на рис. 4-9.

Вывод основан на разнице между двумя сагиттами волнового фронта или на том, насколько волновой фронт «сжат» в апертуре. Другая распространенная сагитта связана с формой поверхности (или небольшой глубиной самого зеркала). Это половина сагитты волнового фронта. Не путайте поверхностную сагитту с сагиттой волнового фронта.

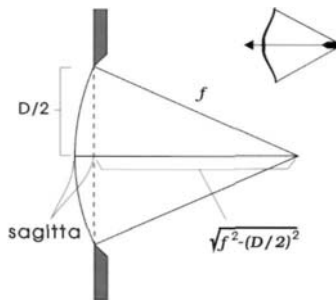


Рис Е-1. Геометрия сагиттального отношения. Фокусное расстояние f — это радиус кривизны волнового фронта.

Если расстояние до положения фокусировки c' если D — диаметр отверстия, то по теореме Пифагора получается

$$c' = \sqrt{D^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (\text{E.1})$$

Если фокусное расстояние намного больше диаметра апертуры, это уравнение можно аппроксимировать, выполнив разложение Тейлора. Такое приближение приводит к

$$c' \approx \frac{D^2}{8f} \quad (\text{E.2})$$

Взяв разницу между двумя разными сагиттами волнового фронта в уравнении E.2,

$$c - c' = \frac{D^2}{8f} - \frac{D^2}{8f'} = \frac{D^2}{8} \left| \frac{1}{f} - \frac{1}{f'} \right| = \frac{D^2}{8} \left| \frac{f' - f}{ff} \right| \quad (\text{E.3})$$

Далее мы потребуем, чтобы количество $c - c'$ можно рассматривать как определенное количество длин волн $n\lambda$ не в фокусе, где λ — общий символ длины волны. Заметив, что $\frac{D^2}{8ff}$ с очень высокой степенью точности просто равен квадрату среднего фокусного расстояния, тогда

$$c - c' \approx n\lambda = \frac{(f - f')}{8f^2} \quad (\text{E.4})$$

Где Φ это фокусное соотношение. Окончательное изменение фокуса, измеренное при выдвигании или отведении окуляра, равно

$$e - e' = \Delta e = 8F^2 \Delta n \lambda \quad (\text{E.5})$$

Кроме того, мы можем вывести выражение для глубины неглубокой чаши в зеркале, заметив, что фокусное расстояние f в уравнении E.2 можно заменить радиусом кривизны $R = 2f$, или

$$c_D \approx \frac{D^2}{16R} \quad (\text{E.6})$$

Приложение F

Блеск в блестящей сфере

На рисунке F-1а показано отражение в маленькой сфере. В самом общем виде он имеет форму фасоли, длиннее в азимутальном направлении, чем в радиальном. Поскольку ограничивающим фактором является длинная ось боба, сначала выводится выражение для этого угла.

Мы хотим рассчитать θ , длинная ось блеска. Если блеск находится достаточно далеко от центра, его приблизительная длина определяется выражением

$$\frac{\theta}{2} = \frac{r}{I_{KS}} \left| \frac{\varphi}{2} \right| \quad (\text{Ф.1})$$

с I_{KS} радиус круга, содержащего блески, видимые в перспективе и φ угол источника света. Если повернуть сферу, чтобы рассмотреть ситуацию сбоку (рис. F-1в), то радиус I_{KS} получается из радиуса большого круга сферы r и угла отклонения света θ так в

$$I_{KS} = r \left| \frac{\theta}{2} \right|, \quad (\text{Ф.2})$$

с полным выражением

$$\theta = 2r \left| \frac{\theta}{2} \right| \left| \frac{\varphi}{2} \right|. \quad (\text{Ф.3})$$

Таким образом, для сферы диаметром 1 дюйм ($P=0,5$ дюйма) и отражение Солнца ($\varphi=0,5^\circ = 0,0087$ радиан), угол отражения (θ) Угол 90° дает точку блеска длиной 0,003 дюйма. Таким образом, для типичного θ , блеск солнечного отражения будет меньше, чем $1/300$ диаметр сферы.

Аналогично можно получить выражение для короткой оси (u) боба. Это измерение получается путем возмущения рис. F-1с вокруг среднего значения

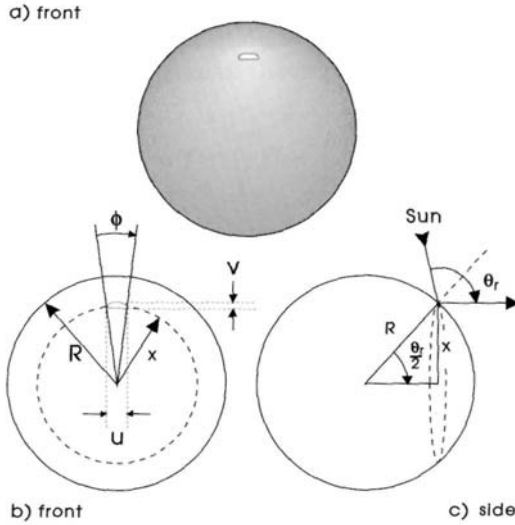


Рис. F-1. Переменные, используемые для определения размера блескотраженной сферы.

угол отклонения,

$$U'' = R \left[\left| \arctan \left(\frac{\theta_r + \phi/2}{2} \right) \right| + \left| \arctan \left(\frac{\theta_r - \phi/2}{2} \right) \right| \right] \quad (Ф.4)$$

Для примера ситуации, составляет 0,0015 дюйма. Точка блеска примерно в два раза шире, чем длинна.

Для почти центрированного отскока с появлением блеска около середины сферы. ($\theta_r = 0$) и для очень малого угла источника ϕ , выражение для U примерно

$$U \approx \frac{R\phi}{2} \quad (Ф.5)$$

Если мы хотим определить размер круглого отблеска, в котором 1-дюймовая отражающая сфера расположена напротив Солнца, мы могли бы использовать это приближение. Числа вставляются следующим образом (угол должен быть в чистом числовом формате, т. е. в радианах):

$$U'' = \frac{0,5 \text{ в.} (0,0087 \text{ радианы})}{2} = 0,0022 \text{ в.} \quad (Ф.6)$$

Размер блесков уменьшается примерно до 1/450 диаметр сферы в наименьшем аспекте. Источник света находится почти за головой зрителя, а отражение примерно по центру блестящей сферы, чтобы возникло это благоприятное условие.

Приложение Ж

Список общих символов

Некоторые символы здесь вообще не появляются, поскольку в разных местах они используются по-разному (хорошим примером является H). Некоторые из них, которые появляются здесь время от времени, используются альтернативными способами. Большинство символов используются только так, как определено в этом приложении, но если читатели в любом случае не уверены, непосредственный контекст имеет приоритет.

A_n	n коэффициент аберрации четвертого порядка.
c	скорость распространения света.
<i>ПЭС-матрица</i>	аббревиатура устройства с зарядовой связью, акроним компакт-диска.
CD	связью, акроним компакт-диска.
D	диаметр объектива или зеркала. аббревиатура
$ЦАП$	цифро-аналогового преобразователя. смещение
Δf	фокуса или изменение фокуса.
e	2,71828....
E	энергия.
$ЭЭР(\theta)$	соотношение окружающей энергии на угловом радиусе θ .
J	эффективное фокусное расстояние объектива. фокусное
Φ	соотношение, используемое в формулах. различные
e, e и т. д.	положения фокусировки.
$J/\#$	"ж-число» или фокусное
$h\nu$	соотношение. Постоянная Планка.
γ	$\sqrt{-1}$
μ	Коэффициент Штреля.
$I(x', y')$	интенсивность в точке изображения (x', y') .

<i>Джо</i>	функция Бесселя нулевого порядка. $k'' = 2\pi/\lambda$,
<i>К</i>	называемое «волновым числом».
<i>λ</i>	длина волны света.
<i>МА</i>	малая, или короткая ось ньютоновской
	диагонали. аббревиатура для передачи
<i>МОГ</i>	модуляции
<i>Мульти</i>	множитель фокусных расстояний на
	расстояние источника Н. Частота
<i>В</i>	(временная или пространственная).
<i>ОТФ</i>	оптическая передаточная функция.
<i>φ</i>	уменьшенный угол изображения $D\theta/\lambda$.
<i>π</i>	3.14159....
<i>P(x,y)</i>	функция зрачка в позиции (x,y) .
<i>ρ</i>	радиус кривизны.
<i>РЭйри</i>	радиус диска Эйри.
<i>РФТ</i>	аббревиатура от телескопа с самым богатым полем зрения.
<i>ρ</i>	радиальная координата апертуры
	(диапазон от 0 до 1).
<i>среднеквадратичное значение</i>	аббревиатура от среднее значение
	квадратическое отклонение волнового фронта.
<i>С</i>	сагитта во всех случаях, кроме Приложения Б.
<i>Среднеквадратичное значение</i>	Среднеквадратичное отклонение
	волнового фронта в длинах волн.
<i>ОСШ</i>	аббревиатура от отношения сигнал/шум (S/N).
<i>T</i>	расстояние от фокальной плоскости до
	центра трубки. Ч. 6 и приложение. С.
<i>T(ρ) или T(x,y)</i>	Коэффициент пропускания как функция
	радиуса апертуры.
<i>U(x',y')</i>	значение комплексного скалярного поля в точке (x', y') .
<i>W(ρ) или W(x,y)</i>	абберрация зрачка в длинах волн.
<i>x или y</i>	обычно координаты апертуры.
<i>x' или y'</i>	обычно координаты изображения.

Глоссарий

Аберрация Любое отклонение от сферически сходящегося волнового фронта после оптического система закончила обработку света, называется аберрацией. Аберрацию обычно определяют одним из двух способов. Наиболее удобное использование лучевой оптики выражает это как отклонение от точки геометрического фокуса. Соглашение волновой оптики определяет это как отклонение от идеальной сходящейся сферы. Эти два, казалось бы, разных определения тесно связаны между собой. Наклон волнового фронта определяет направление распространения лучей в однородной среде.

Размещение Биологическая адаптация к изменению освещения или условий фокусировки.

Ахромат Буквально означая «без цвета», этот термин используется в астрономической оптике для обозначения указывают двухэлементную линзу-рефрактор с поправкой на дисперсию стекла (хроматическую аберрацию) в интересующем цветовом диапазоне. Термин «ахромат» является неправильным. В большинстве дублетов только два цвета намеренно объединены в общий фокус, но полученный свернутый спектр обеспечивает гораздо меньшую дисперсию, чем в простых линзах. (Видеть *рефрактор, апохромат, вторичный спектр, дисперсия, и Хроматическая аберрация.*)

Воздушный диск (Назван в честь ученого начала XIX века сэра Джорджа Эйри.) центральный пик на сфокусированной дифракционной картине внешне напоминает диск. Иллюзия усиливается, поскольку пик окружен областью нулевой интенсивности. Диск имеет мягкий край, поэтому эффективный радиус центрального дифракционного пятна меняется в зависимости от яркости изображения. Яркие пятна выглядят больше. (Видеть *разрешение.*)

Аналитическая геометрия Создан Пьером Ферма и Рене Декартом в начале XVII в. века и получившая дальнейшее развитие более поздних математиков, аналитическая геометрия представляет собой способ сведения геометрических отношений к алгебре.

Угол Деление круга. В этой книге распространены четыре меры: радианы («естественные» или безразмерные), градусы, угловые минуты и угловые секунды. Мера, обозначенная в верхнем левом углу графиков звездного теста, представляет собой уменьшенный угол, действительный для всех инструментов, угол в радианах, умноженный на отношение *ДЛ*. (Видеть *разрешение.*)

Отожженный Если материалы расплавлены и им дают остыть ниже точки затвердевания

слишком быстрое повышение температуры, они будут испытывать постоянные деформации. Неправильно отоженное стекло деформируется под воздействием шлифовки и со временем делает форму поверхности неконтролируемой. Почти никогда не появляясь в очках, изготовленных специально для оптического использования, он часто встречается в стеклянных дисках, приспособленных для оптики, но отлитых с расчетом на другое использование.

Диафрагма Отверстие, через которое в телескоп попадает параллельный свет. Диафрагма обычно измеряется как диаметр наиболее ограничивающего отверстия телескопа до фокусировки света. Некоторая путаница может возникнуть с сокращенной фотографической терминологией, в которой термин «диафрагма» используется взаимозаменяемо с «фокусным соотношением». Здесь диафрагма не используется таким образом.

Стоп диафрагмы Физическое препятствие (обычно круглое отверстие), расположенное где-то впереди. телескопа. Функция диафрагменного ограничителя заключается в ограничении диафрагмы в определенной плоскости. (Видеть *полевая остановка*.)

Апохромат Если три выбранных цвета фокусируются одновременно, говорят, что линза апохроматический. Классическое определение также включает поправки на сферическую aberrацию и кому. Поскольку три цвета в интересующем спектральном диапазоне удерживаются в одном фокусе, вторичный спектр заметно уменьшается. (Смотрите также *ахромат, рефрактор, вторичный спектр, и Хроматическая aberrация*.)

Аподизация Затенение апертуры для уменьшения дифракционных колец. Этот термин пришел к относятся к изменению пропускания и фазы апертуры для достижения любого изменения дифракционной картины.

Угловая минута $1/60$ градусов или $1/21600$ полного круга. (Смотрите также *угловая секунда, градус, радиан, и угол*.)

Угловая секунда $1/60$ угловой минуты, $1/3600$ градусов, или $1/1\,296\,000$ полного круга. 1 угловая секунда = $4,848 \times 10^{-6}$ радианы. (Видеть *угловая минута, градус, радиан, и угол*.)

Асферическая поверхность В оптике — вогнутая или выпуклая поверхность, внешне напоминающая сфера, но имеет другую форму. Чаще всего применяется к коническим секциям, вращающимся вокруг своих осей.

Астигматизм Aberrация, возникающая в результате двух радиусов кривизны, ориентированных вправо. углы друг к другу на оптической поверхности. (Видеть *отклонение*.)

Затухание Уменьшение интенсивности волны, включающее дифракцию, рассеяние, распространение луча и поглощение.

Пропускная способность/полоса пропускания Частотный диапазон, пропускаемый заданным фильтром.

Линза Барлоу Рассеивающая линза, расположенная вблизи фокуса для увеличения эффективного фокусного расстояния инструмент без существенного увеличения физических размеров телескопа.

Стендовые испытания Испытание лабораторного типа в помещении, обычно используемое при изготовлении оптика. Из-за обязательно компактного характера тестирования

геометрии, в большинстве стеновых испытаний астрономических инструментов используются вторичные эталоны или сложные процедуры обработки данных.

катадиоптрический Смешанная линзово-зеркальная система, составляющая объектив или основную оптику. группа.

Каустик Область, где лучи света пересекаются и накапливаются. Фокус – это едкость, но это слово также относится к одномерной фокусировке, возникающей при астигматизме, или даже к квазифокусировке, возникающей в системах, страдающих абберациями. В геометрической оптике каустики — это области, в которых формализм трассировки лучей нарушается.

Хроматическая абберация Цветовые ошибки, вызванные рассеиванием света в стекле. Приведение цвета в разных точках фокусировки оказывают на изображение две формы повреждающего воздействия: все цвета, кроме тех, которые находятся в фокусе, отображаются как расширенные диски, а увеличение зависит от цвета. (Видеть *рефрактор, ахромат, дисперсия, и апохромат.*)

Коллимация Здесь коллимация используется для обозначения достижения точного выравнивания. Более Собственно, это относится к генерации плоского волнового фронта, но хорошее выравнивание и хороший волновой фронт обычно неразделимы.

Кома Абберация, возникающая при наклоне некоторых оптических систем. Редкий по качеству рефракторы, он очень распространен в рефлекторах и катадиоптрических системах. Кома приводит к веерному искажению. (Видеть *абберация*)

Корректор (Видеть *Корректор Шмидта и мениск.*)

Корреляция Выражение подобия двух функций, поскольку они смещены относительно одной. другой. Если функции абсолютно одинаковы, максимальная корреляция равна единице.

Критерий (разрешение) В астрономической оптике этим термином обозначают определенное разделение в разрешенные объекты (например, «звезды разделились точно по критерию Рэлея»). В разговорной речи его также использовали для обозначения оптического качества, например, « $1/4$ — критерий Рэлея длины волны», хотя эту терминологию уместно заменить на «критерий Рэлея $1/4$ -предел длины волны.» (См. *Допуск Рэлея или критерий Рэлея.*)

Куртатная циклоида Циклоида – это путь, по которому движется точка на ободе колеса. Куртат циклоида — это путь точки, расположенной ближе к оси.

критерий Дауэса Угол разделения около $1,02\lambda/D$. Это происходит между рыхлыми Критерий Рэлея и жесткий критерий Воробья.

Децибел Первоначально предполагалось изменение интенсивности звука (или любого сигнала) в 10 раз. назывался «бел». Поскольку это изменение было слишком грубым, ремни никогда не использовались. Люди предпочитали более точную меру «децибел». Уровень дБ_я со ссылкой на *это* 10 журналов $10(\text{я}/\text{я}2)$.

Расфокусировка Используемая здесь величина расфокусировки представляет собой, точнее, абберацию дефокусировки. измеряется в длинах волн света. Этого числа не должно быть

пугают с расстоянием дефокусировки или с тем, насколько далеко нужно переместить окуляр, чтобы получить абберацию дефокусировки. (См. Таблицу 5-1.)

Степень $1/360$ полного круга. Причина, по которой ранние математики, вероятно, использовали такое Особое число состоит в том, что его можно разделить на множество целых частей: 180, 120, 90, 72, 60, 45, 36, 30, 20, 18, 16, 15, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3 и 2. Эта мера была очень полезна до того, как была изобретена десятичная система счисления (с ее компактным алгоритмом деления в столбики). Также равен $\pi/180$ или около $\pi/57,3$ радиан. (Видеть *угловая минута, угловая секунда, радиан, и угол.*)

Диэлектрик Непроводящий материал, который поляризуется в электрическом поле (т. е. развиваются «электрические полюса», подобные «магнитным полюсам»). Многие такие материалы прозрачны для видимого света. Стекло, полиэстер, воздух и кварц — примеры диэлектриков.

Ограниченный дифракцией Традиционно используется как эквивалент $\lambda/14$ -длина волны RMS Предел отклонения волнового фронта Марешала. В разговорной речи оно означает то же самое, что и Предел Рэлея $\lambda/4$ длины волны, но такое использование справедливо только для широко варьирующихся деформаций волнового фронта, таких как ошибка коррекции.

Диоптрия Мера силы фокусировки линзы. Линза, имеющая силу 2 диоптрии, имеет фокусное расстояние $1/2$ метра, 3 диоптрии, фокусное расстояние $1/3$ метра и т. д. Таким образом, человеческий глаз, фокусирующий на расстоянии около дюйма, имеет собственную силу примерно 40 диоптрий. Коррекция фокусировки, типичная для очков — от 1 до 4 диоптрий — это незначительные корректировки.

Дисперсия Частотная или цветовая зависимость оптических эффектов. Дисперсия в преломлении материалов приводит к желаемым эффектам в спектроскопах и нежелательным эффектам, когда целью являются изображения в белом свете. Явление хроматической абберации в линзах представляет собой разницу фокусных расстояний света в различных участках спектра. В результате белый свет распадается на цвета радуги.

Дублет Две линзы, расположенные в непосредственной близости, действуют как единое целое. Использовал для исправления различных дефектов одиночных линз, особенно хроматических аббераций. (Видеть *ахромати* *Хроматическая абберация.*)

Динамический диапазон Диапазон интенсивности, в котором приблизительно находится датчик или излучатель. линейный. Динамический диапазон обычно указывается в децибелах.

Эффективный *Эффективный* применяется к другой величине, например фокусному расстоянию или фокусному отношению. Сложные многоэлементные системы, такие как телескопы Кассегрена или использование линзы Барлоу в телескопе, требуют некоторой уравнивающей терминологии, чтобы сделать их описание сопоставимым. Например, «эффективное фокусное расстояние» равно фокусному расстоянию, если сложную оптику заменить одной тонкой линзой. «Эффективное фокусное соотношение» определяется путем изучения того, насколько резко световой конус сходится к фокусу. Телескопы Кассегрена намного короче, чем указывают их эффективные фокусные расстояния и соотношения.

Недолговечные волны Волны, которые могут возникать только на границе раздела сред разных оптические характеристики. Они не могут распространяться за пределы интерфейса и привязаны к этой поверхности.

Полевая остановка Маска, определяющая поле вблизи фокуса. Обычно он виден в окуляр как четко очерченный круг. Этот круг не является краем основной линзы или зеркала, а находится внутри самого окуляра. Его можно увидеть в большинстве окуляров, сняв окуляр и перевернув его. Это отверстие с острым краем, через которое можно увидеть линзы. (Видеть стоп диафрагмы.)

Фигура (существительное) Форма оптической поверхности. (Глагол) Выполнить полировку операции по достижению правильной формы.

Фокусное расстояние Если бесконечно удаленная цель отображается линзой или зеркалом, фокусное расстояние оптический элемент — это расстояние от линзы или зеркала, на котором достигается наиболее четкое изображение цели. Здесь, если не указано иное, под фокусным расстоянием понимается эффективное фокусное расстояние объективной системы, а не окуляра.

Фокальное соотношение Соотношение эффективного фокусного расстояния и диафрагмы и есть светосила. Это написано как $F = f/D$, где F это фокусное соотношение, D диаметр апертуры и/или фокусное расстояние. Условно 6-дюймовый телескоп с фокусным расстоянием 48 дюймов называется системой «f/8», потому что $48/6$ равно 8.

преобразование Фурье Математическая процедура, используемая для получения частотного содержания функция.

тест Фуко Тест с использованием затемняющего края, расположенного рядом с точкой или фокусом

цели. **Линии Фраунгофера** Темные линии солнечного спектра, обозначенные алфавитом.

зона Френеля Концептуальное устройство для отслеживания знака фазы. В местах, где Если волна выше своего среднего значения, она находится в положительной зоне Френеля, а если волна ниже своего среднего значения, она находится в отрицательной зоне Френеля. Таким образом, данная зона Френеля применима только в данный момент времени и является лишь приближением того, что происходит на самом деле.

Функция Гаусса Функция формы Ae^{-x/w^2} с амплитудой A и $1/2$ еполювина ширины w . Случайные отклонения часто подчиняются распределению Гаусса, как и хорошо известная «колокольчатая кривая».

Геометрическая тень В приближении трассировки лучей «свет как частицы» геометрическая тень состоит из областей за конусом, простирающихся от апертуры и проходящих через фокус.

зернистость Сыпучие частицы абразива, используемые при шлифовании оптических поверхностей. Размер зерна варьируется от крупных пескоподобных зерен до порошкообразных чистовых абразивов.

Гиперболоид Трехмерная поверхность, имеющая форму притупленного конуса.

бессвязный Когда складываются две волны, они называются некогерентными, если у них нет фазовые соотношения друг с другом. В один момент они могут конструктивно прибавлять, а в следующий – деструктивно вычитать. Когерентный свет обычно возникает в результате одного и того же атомного перехода или одного и того же резонанса полости (в лазерах), а некогерентный свет – в результате несвязанных переходов. Сильное ограничение геометрии (например, фокусировка света на одной или нескольких щелях) часто позволяет достичь приблизительной пространственной когерентности даже некогерентного во времени света. В звездном тесте свет излучается из незаметно маленькой точки, звезды или точечного отверстия, поэтому принцип Гюйгенса-Френеля рассматривает его как когерентный (см. *вмешательство*.)

Показатель преломления (Видеть *показатель преломления*.)

Интенсивность В данном случае интенсивность пропорциональна квадрату значения волны. На самом деле, это Число не является интенсивностью, определенной радиометрически, но неправильное использование стало обычным явлением.

Помехи Когда интенсивность рассчитывается по сумме двух когерентных волн, она равна придумал что-то вроде этого уравнения: $I = (B_{T1} + B_{T2})^2 = (B_{T1})^2 + (B_{T2})^2 + 2 B_{T1} B_{T2}$ Член в конце уравнения называется интерференционным членом. Если $B_{T2} = - B_{T1}$, этот термин полностью отменяет первые два. Если $B_{T2} = B_{T1}$, интенсивность увеличивается в два раза. Для некогерентного света этот член может быть любым в данный момент, но в среднем за более длительные периоды времени он достигает нуля.

Ирис Ограничитель диафрагмы, регулируемый по диаметру. Глаз имеет радужную оболочку и большинство камер. иметь лепестковую диафрагму, используемую для регулировки светосилы. Радужная оболочка обычно помещается внутри или рядом со зрачком в афокальном луче света. (Видеть *стоп диафрагмы*.)

Испытание на острие ножа Разговорное выражение для теста Фуко.

Колени Сокращение от «притирочный инструмент», представляющий собой диск, покрытый смолой и напудренный для полировки.

агент в растворе воды. Лапы используются для полировки оптики. Обычно они пересекаются траншеями («каналами»), прорезанными в перехлесте для облегчения соответствия обрабатываемому оптическому элементу.

Продольный Здесь используется ориентация вдоль оси инструмента. Противоположный поперечного. Обычное изображение, наблюдаемое в окуляр, представляет собой поперечный срез. Продольный срез обычно находится в плоскости, проходящей через центры объектива и окуляра.

Увеличение Буквально: размер объекта, разделенный на размер изображения. Полезность этого Этот термин теряет смысл, когда мы говорим об очень удаленных и очень больших объектах. В астрономических телескопах гораздо чаще говорят *угловое увеличение*. Угловое увеличение относится к углу, образуемому объектом в окуляре, деленному на угол, образуемый без оптической помощи. Таким образом, если мы посмотрим на Луну в полградуса в бинокль с увеличением 7, мы должны увидеть изображение, простирающееся на видимые 3,5 градуса.

Величина Разница блеска между двумя звездами составляет — $2,51 \log_{10}(j_1/j_2)$. Таким образом, если одна звезда в 10 раз ярче другой, она ярче всего на 2,5 звездной величины. Магнитуда аналогична шкале децибел, используемой в электронике или звуке, а также шкале землетрясений Рихтера. По историческим причинам она увеличивается с более тусклыми звездами.

Мениск Оптически мениск представляет собой сильно изогнутую линзу с большой кривизной, но небольшая фокусирующая способность. Другими словами, его кривизна на задней стороне очень близка к кривизне передней части. Линза корректора телескопа Максутова представляет собой мениск.

Микрометр Единица измерения, равная 10⁻⁶ метры. Двадцать лет назад это подразделение находилось в обычно используется как «микрон». На самом деле, по международному соглашению все метрические единицы длины обозначаются «-метрами», но здесь это соглашение не соблюдается.

Микрорябь Шероховатость поверхности, возникающая из коррелированной области порядка 1 мм. через. Микропульсация обычно имеет очень небольшую амплитуду.

Модель, моделирование Подгонка явления к математической системе, которая может быть или не быть физически получено. Подбор может быть эмпирическим, без какой-либо научной основы, но лучшие и наиболее расширяемые модели обычно основаны на фундаментальной теории.

Функция передачи модуляции MTF предсказывает способность оптической системы сохранять контраст светлого и темного в периодических мишенях со все более мелким расстоянием между полосами.

Ньютоновский телескоп О параболическом отражателе впервые объявил сэр Исаак Ньютон в 1672. Для астрономических целей она не пригодилась, пока Джон Хэдли не создал первую приблизительно параболическую поверхность в 1721 году.

Нормализованный Нормированный интеграл приведен к значению единицы в идеале. случай. Таким образом, интеграл, скажем, от энергии по апертуре умножается на константу и дает значение 1,00. Такая процедура полезна при сравнении несовершенных апертур с идеальными.

Цель Основной элемент или группа элементов, образующих изображение в телескопе. Часто это полезно приравнять «объективную» к «несъёмной» оптике в системе.

Сплюснутый сфероид Коническая поверхность вращения, более плоская посередине. Сплюснутый сфероидальное зеркало, сфокусированное на бесконечность, имеет большую сферическую aberrацию, чем сфера.

Оптическая передаточная функция Полная комплексная форма пространственно-частотной передаточной функции. Его абсолютное значение является передаточной функцией модуляции. Обеспечивает контраст и смещение положения синусоидальной полосы.

Чрезмерно исправленный Форма сферической aberrации низкого порядка, при которой краевые лучи пересекаются вне фокуса центральных лучей. В ньютоновских телескопах перекорректированное зеркало является гиперболическим. (Видеть *недокорректировано*.)

Параболоид Теоретическая кривая между вытянутыми сфероидами и гиперboloидами. Представляет идеал в изготовлении зеркал Ньютоновского телескопа.

Параксиальный фокус Фокус лучей, падающих в центр зеркала или около него и параллельных ему. ось инструмента. Редко то же самое, что «лучший» фокус.

Фотодетектор Датчик, способный обнаруживать один или несколько отдельных фотонов.

Яма Неполированный кратер, оставшийся от процесса шлифовки, оставшийся в полированном поверхности.

Полихроматический Наличие множества цветов. Белый свет полихроматичен.

Первичные аберрации Чистые формы аберраций низшего порядка. Примеры включают кому, сферическая аберрация, астигматизм и т. д. (также называется *Аберрации Зейделя*.)

Первичная пульсация Грубая, квазипериодическая шероховатость, имеющая расстояние примерно такое же, как и каналы в притирочном инструменте. (Видеть *колени*.)

Вытянутый сфероид Коническая поверхность вращения, промежуточная между сферой и сферой. параболоид.

Квантовая механика Название, применяемое к волновой теории материи. Когда волнообразный частицы захватываются потенциальной ямой (например, электрон в кулоновском поле атома), требование того, чтобы волны точно помещались в эти ямы, требует, чтобы были заняты только определенные энергетические состояния. Таким образом, энергию можно добавлять или вычитать из таких систем только дискретными шагами (называемыми квантами).

Радян Мера угла, равная перемещению одной единицы по периметру круга. с единичным радиусом. Радян — это «естественная» мера угла, поскольку он безразмерен. Слово «радианы» на самом деле является заполнителем. Частота 2π радиан в секунду — это то же самое, что 2π в секунду. Угол 2π означает, что пройден один полный цикл окружности. (Видеть *угол, угловая минута, угловая секунда, и степень*.)

Радиатор Элементарный источник вторичных волн, используемый в теории Гюйгенса-Френеля. дифракция.

критерий Рэлея Когда двойная звезда отделена расстоянием, равным радиусу Для любой звезды, диска Эйри, расстояние, как говорят, соответствует критерию Рэлея. Большинство наблюдателей способны различать звезды, расстояние между которыми меньше этой величины, но они делают это больше за счет формы пары, а не за счет затемнения между ними.

Допуск или предел Рэлея Оптика, удовлетворяющая пределу Рэлея, создает волновые фронты, которые могут быть заключены в концентрические оболочки с радиусами, отличающимися на $1/4$ длины волны желто-зеленого света. (Видеть *среднеквадратичное значение*.)

Показатель преломления Отношение скорости света в пустом пространстве к скорости света в материал. Примеры: вода имеет показатель преломления 1,3, а большинство стекол — где-то более 1,5. Изменение показателя преломления в зависимости от длины волны является традиционным способом описания дисперсии.

Разрешение Мера оптического качества, которая зависит исключительно от того, равны ли два различимы яркие бессвязные точки или полосы света. (Видеть *передаточная функция модуляций* и *функция оптической передачи*.)

среднеквадратичное значение Означает «среднеквадратичное значение» или квадратный корень из усредненных отклонений в квадрате. В телескопах среднеквадратичное значение используется как мера качества поверхности оптических элементов: более низкие значения соответствуют более совершенной оптике.

Руж (или *Ювелирные румяна*) Порошкообразный оксид железа, используемый в полировальных составах. **Рассеяние** Дифракция от случайно распределенных оптических дефектов или препятствий.

Шифшпиглер Немецкое слово, означающее «косой отражатель». Шифшпиглер - это телескоп, который позволяет избежать дополнительной дифракции центрального препятствия за счет использования наклонных круглых зеркал.

корректор Шмидта Пластина, помещенная в входящий параллельный луч для создания равного и величина сферической аберрации, противоположная той, которую производит остальная часть оптической системы. Типичная кривая, определяющая корректор Шмидта, представляет собой радиальный полином 4-го порядка.

Вторичный спектр Остаточная хроматическая аберрация, существующая на ярких участках спектра (среди намеренно скорректированных длин волн) даже после того, как была предпринята хорошая попытка исправить ошибку цвета. (Видеть *хроматическая аберрация*, *ахроматическая*, *апохроматическая*, и *дисперсия*.)

Аберрации Зейделя Самое раннее формальное описание сферической аберрации, комы, астигматизма, кривизны поля и искажение с использованием полиномов и тригонометрических функций. Также называются «первичными» аберрациями или первыми нетривиальными компонентами обобщенного расширения аберраций.

Затенение (Видеть *аподизация*.)

Отношение сигнал/шум (SNR) Сравнение количества интересных информации к объему неинтересной информации по мере ее передачи через систему. Поскольку мощность шума обычно намного меньше мощности сигнала, отношение сигнал/шум обычно указывается в децибелах. Желательны более высокие значения SNR. (Видеть *децибелы*.)

Критерий Воробья Если разделение двух точек света устанавливается там, где дифракция структура создает плоский перешеек, соединяющий их, тогда говорят, что они разделены по критерию Воробья.

Пятнышки Маленькие точки света, окружающие изображение, созданное на шероховатых поверхностях или турбулентные СМИ. Пятна возникают в результате интерференции.

Сферическая аберрация Когда сходящийся волновой фронт вычитается из сферы с центром в наилучшем фокусе любой остаток, описываемый радиальными полиномами низкого порядка, называется «сферической аберрацией».

Коэффициент Штреля Отношение максимальной центральной яркости изображения aberrированной апертуры что было бы, если бы aberrацию устранить. Коэффициент Штреля 0,8 связан с $\lambda/4$ - допуск Рэлея на длину волны.

Субстрат Зеркало телескопа представляет собой слой металла толщиной около 100 нанометров. Стакан удерживая его, правильно называют «субстратом».

Суперпозиция Если совокупное воздействие двух волн не сложнее, чем простая сумма волн, система называется линейной, а суммарный эффект называется линейной суперпозицией двух волн. Другими словами, никакого эффекта от влияния одной волны на другую не возникает. Интенсивные световые лучи не подчиняются суперпозиции в нелинейных средах. Все оптические явления в этой книге предполагаются линейными. (Видеть *помехи*).

Телефото Задний элемент линзы, увеличивающий эффективное фокусное расстояние. Отличается от Линза Барлоу прежде всего тем, что она несъемная и специально разработана для работы с оптической системой.

Недостаточно исправленный Здесь используется тип сферической aberrации низкого порядка, при которой маргинальная лучи пересекаются ближе к цели, чем центральные лучи.

Волновая функция Трехмерная функция, описывающая волну, обычно включая ее амплитуда, фаза и направление распространения.

Вейвлет Здесь этот термин относится к крошечным последующим волнам, испускаемым Гюйгенсом. Радиаторы Френеля. Это также относится к математическому методу, используемому при обработке сигналов, но в этой книге оно не применяется.

Клин Призматическая aberrация рефракционных линз. Хотя клин может возникнуть из-за линзы если одна сторона на самом деле толще, это также может быть результатом децентрированной симметричной линзы.

Зоны Сокращение «зональных дефектов», они представляют собой частный случай сферической aberrации. «Зоны» можно рассматривать как локализованные круглые гофры на поверхности.

Рекомендации

- Оллред и Миллс, 1989 г.** Дэниел Б. Оллред и Джеймс П. Миллс, «Эффект аббераций и аподизация на характеристики когерентных оптических систем. 3: Ближнее поле». *Прикладная оптика*, том. 28, нет. 4, стр. 673–681, 15 февраля 1989 г.
- Бачинский и Бекефи, 1957 г.** М. П. Бачинский и Г. Бекефи, «Исследование оптической дифракции». Изображения на микроволновых частотах». *Журнал Оптического общества Америки*, том. 47, нет. 5, стр. 428–438, май 1957 г.
- Бейкер 1992 г.** Лайонел Бейкер, *Избранные статьи по оптической передаточной функции: измерение*, Серия SPIE Milestone, том MS 60, SPIE Optical Engineering Press, 1992.
- Бейкер и Копсон, 1950 г.** Беван Б. Бейкер и Э.Т. Копсон, *Математическая теория Принцип Гюйгенса*, Oxford Clarendon Press, Оксфорд, Великобритания, 1950.
- Баракат 1962 г.** Ричард Баракат, «Решение проблем аподизации Люнеберга», *J. Opt. Soc. Являюсь.*, том. 52, нет. 3, стр. 264–275, март 1962 г.
- Белл 1922 г.** Луи Белл, *Телескоп*, МакГроу-Хилл, 1922 г., перепечатка в Дувре, 1981 г.
- Берри 1979 г.** М. В. Берри, «Дифракталы». *Дж. Физ. А: Математика. Генерал*, том. 12, нет. 6, стр. 781–797, 1979.
- Берри и Блэквелл, 1981 год.** М. В. Берри и Т. М. Блэквелл, «Дифрактакльное эхо». *Дж. Физ. А: Математика. Ген.* том. 14, стр. 3101–3110, 1981.
- Берри 1992 г.** Ричард Берри, «Как **строить** портативная искусственная звезда», *Небо и телескоп* (Кочерга для банкоматов), с. 572, ноябрь 1992 г.
- Бейер и Клюн, 1988 г.** Луи М. Бейер и Лаверн К. Клюн, «Интенсивность и окружение» энергия для круглых зрачков, скрытых центральными затемнениями, поддерживаемыми стойками», *Прикладная оптика*, том. 27, нет. 24, 15 декабря 1988 г.
- Рожденный и Волк 1980** Макс Борн и Эмиль Вольф, *Принципы оптики*, 6-е изд., Пергам Пресс, 1980.
- Бригам 1988 г.** Э. Оран Бригам, *Быстрое преобразование Фурье и его приложения*, Прентис-Холл, Энглвуд Клиффс, Нью-Джерси, 1988 год.
- Бухдал 1970 г.** ХА. Бухдал, *Введение в гамильтонову оптику*, стр. 232–234, Издательство Кембриджского университета, 1970 г. (переиздано Dover Publications в 1993 г.).

- Бухредер 1994 г.** Р. А. Бухредер, частная переписка, 1994 г.
- Берч 1985 г.** Д. С. Берч, «Дифракция Френеля на круглой апертуре». *Американский журнал Физика*, том. 53, нет. 3, стр. 255–260, март 1985 г.
- Кагнет и др. 1962 год** М. Кагнет, М. Франкон, Ж. К. Тьерр, *Атлас оптических явлений*, Springer-Verlag, Геттинген и Гейдельберг, 1962 г.
- Каперсыи др. ал. 1991 год** Роберт С. Кэйперс, Эрик Липтон и штатные авторы книги «Зазеркалье... Как недостаток отражает трещины в космической науке» 31 марта — 3 апреля 1991 г. *Хартфорд Курант*, Хартфорд Коннектикут.
- Чераволо и др. 1992 год** Питер Сераволо, Теренс Дикинсон и Дуглас Джордж «Оптическая Качество в телескопах». *Небо и телескоп*, том. 83, нет. 3, стр. 253–257, март 1992 г.
- Конради 1957 г.** А. Е. Конради, *Прикладная оптика и оптический дизайн*, Дуврские публикации, Часть первая-1957 год (Часть вторая-1960 год).
- Корнехо и Малакара, 1970 г.** А. Корнехо и Д. Малакара, «Испытание Рончи асферических Поверхности, анализ и точность», *Прикладная оптика*, том. 9, нет. 8 августа 1970 г., стр. 1897–1901.
- КПР 1973 г.** *Справочник по химии и физике*, 54-е изд., изд. Роберт К. Уэст, The Издательство компании Chemical Rubber Company, 1973.
- Данжон и Кудер, 1935 г.** Андре Данжон и Андре Кудер, *Люнеты и телескопы*, Éditions de la Revue D'Optique Théorique et Instrumentale, Париж, 1935 г. [на французском языке]
- Дельво 1985 г.** Пьерино Дельво, «Точечная дифракционная интерферометрия стала проще» *Небо & Телескоп* (Крупницы для банкоматов), февраль 1985 г.
- Дакин 1962 г.** Р. К. Дакин, «Размещение и выравнивание ньютоновской диагонали». *Небо & Телескоп* (Крупницы для банкоматов), стр. 368-369, декабрь 1962 г. *опечатка*. 114, февраль 1963 г.
- ди Франция 1952 г.** Дж. Торальдо ди Франция, «Антенна со сверхусилением и оптическое разрешение». Власть, "Дополнение к тому IX, Серия IX del Nuovo Cimento, нет. 3, 1952.
- Дольф 1946 г.** К. Л. Дольф, «Текущее распределение широкополосных массивов, оптимизирующее Связь между шириной луча и уровнем боковых лепестков», *Учеб. Инст. Радио англ.*, том. 34, с. 335, июнь 1946 г.
- Эдберг 1984 г.** Стивен Дж. Эдберг, «Аподизация экранов: критическая оценка», *Телескоп Изготовление № 24*, п. 12. **Падать** 1984.
- Эркила и Роджерс, 1981 г.** Джон Х. Эркила и Марк Э. Роджерс, «Дифрагированные поля в фокусный объем сходящейся волны», *J. Опт. Соц. Являюсь.*, том. 71, нет. 7, стр. 904–905, июль 1981 г.
- Гудман 1968** Дж. В. Гудман, *Введение в оптику Фурье*, МакГроу-Хилл, 1968 год.

- Гордон 1984 г.** Роджер В. Гордон, «Аподизинг и Мецгер», Письма, *Изготовление телескопов* № 24, п. 47, осень 1984 г.
- Харрингтон 1987 г.** Стивен Харрингтон, *Компьютерная графика, подход к программированию*, 2-е изд., МакГроу-Хилл, Нью-Йорк, 1987.
- Хехт 1987 г.** Юджин Хехт, *Оптика*, 2-е изд., Аддисон-Уэсли, Ридинг, Массачусетс, 1987.
- Хуфнагель 1993 г.** Роберт Э. Хуфнагель, «Распространение через атмосферную турбулентность», Глава. 6 дюймов *Справочник по инфракрасному излучению*, ред. Уильям Л. Вулф и Джордж Дж. Зиссис, Центр анализа инфракрасной информации, Институт экологических исследований Мичигана, 4-е издание, 1993 г.
- Ингаллс 1976 г.** Книга первая по изготовлению любительских телескопов, 4-е изд., под редакцией Альберта Г. Ингаллса, Scientific American, Inc., 1976 г. (первоначально опубликовано в 1935 г.). Книга вторая-1978 г. (орг. 1937 г.) и книга третья-1953 г. одного и того же издательства.
- Жакино 1958 г.** Пьер Жакино «Аподизация» (Приложение Д) *Концепции классической Оптика*, Джон Стронг, Фриман и компания, 1958 г.
- Жакино и Ройзен-Досье 1964 г.** П. Жакино и Б. Ройзен-Досье, «Аподизация». [альтернативное написание] *Прогресс в оптике Том III*, ред. Э. Вольф, с. 29 лет, Северная Голландия, 1964 г.
- Кестнер 1981 г.** Боб Кестнер, «Шлифование, полировка и обработка тонких зеркал телескопа», Часть 1-Шлифовка, *Изготовление телескопа* № 12, стр. 30-35, лето 1981 г. (Часть 2: *ТМ* № 13; Часть 3: *ТМ* № 16).
- Король 1955 г.** Генри К. Кинг, *История телескопа*, Чарльз Гриффин и компания, 1955 г. Перепечатка Дувра, 1979 г.
- Кингслейк 1948 год** Р. Кингслейк, «Дифракционная структура элементарной комы». Изображение, "Учеб. Физ. Соц", том. 61, с. 147, 1948.
- Кингслейк 1978Р.** Кингслейк, *Основы проектирования объектов*, Академик Пресс, Инк., 1978.
- Кинслер и др. 1982 год** Лоуренс Э. Кинслер, Остин Р. Фрей, Алан Б. Коппенс и Джеймс В. Сандерс, *Основы акустики*, 3-е изд., Джон Уайли и сыновья, Нью-Йорк, 1982.
- Леонард 1954 г.** Артур С. Леонард в колонке «Астроном-любитель» журнала *Научный американский*, ред. Альберт Г. Ингаллс, с. 104, июнь 1954 г.
- Ли 1982 г.** Яджун Ли, «Зависимость смещения фокуса от числа Френеля и числа f», *Дж. Опция Соц. Являюсь*, том. 72, нет. 6, стр. 770-774, июнь 1982 г.
- Люнебург 1964 г.** РК Люнебург, *Математическая теория оптики*, Калифорнийский университет Press, Berkeley & Los Angeles, 1964. (В первом издании 1944 года имя Люнебурга было написано с ошибкой «Люнеберг»; к сожалению, это написание было распространено в литературе).

- Махаджан 1981 г.** Вирендра Н. Махаджан, «Кольцевые полиномы Цернике для систем визуализации». с кольцевыми зрачками». *J. Opt. Soc. Являюсь*, том. 71, нет. 1 января 1981 г.
- Махаджан 1982 г.** Вирендра Н. Махаджан, «Коэффициент Штреля для первичных аберраций: некоторые аналитические результаты для круглых и кольцевых зрачков». *J. Opt. Soc. Являюсь*, том. 72, нет. 9 сентября 1992 г.
- Маллик 1978 г.** С. Маллик, «Интерферометры общего пути» в *Тестирование оптического цеха*, ред. к Дэниел Малакара, Уайли, 1978.
- Мандельброт 1983 г.** Б.Б. Мандельброт, *Фрактальная геометрия природы*, УН Фриман, Сан Франциско, 1983 год.
- Марешаль 1947 г.** Андре Марешаль, «Этюды эффектов сочетают в себе дифракцию и геометрические аберрации на изображении световой точки», *Оптическое ревю*, том. 26, нет. 9, стр. 257–277, 1947.
- Маурер 1991 г.** Андреас Маурер, «Измерение разрешения в помещении», *Небо и телескоп* (Собранная информация для банкоматов), сентябрь 1991 г.
- Мобсби 1974 г.** Э.Г. Мобсби, «Нулевой тест Рончи для параболоидов». *Небо и телескоп* (Собранная информация для банкоматов), ноябрь 1974 г.
- Мюрден 1974 г.** Джеймс Мюрден, *Справочник астронома-любителя*, Кроуэлл, Нью Йорк, 1974 год.
- Мурата 1965 г.** Кадзуми Мурата, «Приборы для измерения оптического переноса. Функции», *Прогресс в оптике V*, ред. Э. Вольф, Северная Голландия, 1965 г.
- Ниенхейс и Нейбоер, 1949 г.** К. Ниенхейс и БРА Нейбоер, «Теория дифракции Аберрация. Часть III: Общие формулы для малых аберраций: экспериментальная проверка теоретических результатов». *Физика*, том. 14, нет. 9, стр. 590–608, январь 1949 г.
- Остерберг и Уилкинс, 1949 г.** Гарольд Остерберг и Дж. Эрнест Уилкинс-младший, «The Разрешающая способность объектива с покрытием» *Журнал Оптического общества Америки*, том. 39, нет. 7, с. 553, июль 1949 г.
- Парк 1974 г.** Дэвид Парк, *Введение в квантовую механику* 2-е изд., McGraw-Hill, Inc., 1974.
- Паррент и Томпсон, 1969 г.** Джордж Б. Паррент-младший и Брайан Дж. Томпсон, *Физический Оптика Блокнот*, Общество инженеров фотооптических приборов (SPIE), Редондо-Бич, Калифорния, 1969.
- Пейтген и Саупе, 1988 г.** *Наука фрактальных изображений*, ред. Х. Пейтген и Дейтмар Саупе, Springer-Verlag, Нью-Йорк, Берлин, 1988 г.
- Пельтье 1965 г.** Лесли С. Пельтье, *Звездные ночи*, стр. 215–216, Sky Publishing, Кембридж, Массачусетс, 1965 год.
- Питерс и Пайк, 1977 год.** У.Т. Питерс и Р. Пайк, «Размер ньютоновской диагонали». *Небо и телескоп* (Корзины для банкоматов), с. 220, март 1977 г.

- Пресс и др. 1986 год** Уильям Х. Пресс, Брайан П. Фланнери, Сол А. Теукольски и Уильям Т. Феттерлинг, *Численные рецепты: искусство научных вычислений (Фортран)*, Издательство Кембриджского университета, Кембридж, 1986.
- Пругна 1991 г.** Ф.Д. Пругна, «Подход Монте-Карло к тесту Рончи», *Небо & Телескоп* (Астрономические вычисления), апрель 1991 г.
- Родье 1981 г.** Ф. Родье, «Эффекты атмосферной турбулентности в оптических системах». *Астрономия, Прогресс в оптике*, ред. Э. Вольф, том. XIX, стр. 281–376, Северная Голландия, 1981.
- Рончи 1964 г.** Васко Ронки, «Сорок лет истории решетчатого интерферометра». *Применяемый Оптика*, том. 3, нет. 4, стр. 437–450, апрель 1964 г.
- Руттен и ван Венрой, 1988 г.** Х.Г.Дж. Руттен и М.А.М. ван Венрой, *Телескоп Оптика: оценка и проектирование*, Уиллманн-Белл, Инк. 1988.
- НТ 1990** «Обнаружен недостаток Хаббла». *Небо и телескоп*, Ноябрь 1990 г., с. 470. **Шредер 1987 г.** Дэниел Дж. Шредер, *астрономическая оптика*, Академик Пресс, Инк., 1987.
- Шульц 1980 г.** С. Шульц «Макалестерская четырехцелевая система изготовления зеркал и Тест Рончи», *Изготовление телескопа №9*, Осень 1980 года.
- Сиджвик 1955 г.** Дж. Б. Сиджвик, *Справочник астронома-любителя*, 4-е изд., Ан-медленно Издательство, Хиллсайд, Нью-Джерси (1980).
- Синнотт 1990 г.** «Великолепная оптика HST... Что пошло не так?» *Небо и телескоп*, Октябрь 1990 г., с. 356.
- Синнотт 1991 г.** Р.В. Синнотт, «Фокус и согласование: насколько важно?» *Небо и телескоп* (Астрономические вычисления), май 1991 г.
- Смартт и Стронг 1972Р.** Н. Смартт и Дж. Стронг «Точечный дифракционный интерферометр» (Абстрактный). *Опт. Соц. Являюсь*, том. 62, с. 737, 1972.
- Смартт и Стил, 1975 г.** Р. Н. Смартт и В. Х. Стил, «Теория и применение точечного метода». *Дифракционные интерферометры*. Учеб. Конференция ICO. Опция Методы в науке. и инд.измер., Токио, 1974 год, Япония. *Дж. Прил. Физ.* том. 14, (1975), Доп. 14-1.
- Стронг и Плитник, 1992 г.** Уильям Дж. Стронг и Джордж Р. Плитник, *Музыка Речевое аудио*, Звуковой отпечаток, Прово ЮТ, 1992.
- Суитер 1983 г.** Д. Сьютер, «Звезда тестирует ваш телескоп», *Астрономия*, Апрель 1983 года.
- Суитер 1986а** Д. Суитер, «Модификации дифракционного изображения, вызванные поверхностью». *Грубость в зеркалах*. *Изготовление телескопа № 28*, п. 24, осень 1986 г.
- Суитер 1986б** Д. Суитер, «Изменение апертуры зрачка», *Изготовление телескопа № 29*, п. 34, Зима 1986/87.
- Суитер 1987** Д. Суитер, «Письмо новичку». *Глубокое небо* том. 5, нет. 1, весна 1987 г.

- Суитер 1988 г.д.** Сьютер, «Испытание параболидальных зеркал». *Изготовление телескопа № 32*, Весна 1988, с. 4.
- Суитер 1990 г.д.** Сьютер, «Тест-драйв вашего телескопа», *Астрономия*, стр. 56-61, май 1990 г.
- Тейлор 1983 г.Х.** Деннис Тейлор, *Настройка и проверка объективов телескопов*, 5-е место изд., впервые опубликовано в 1891 г., Adam Hilger Press, 1983.
- Тейлор и Томпсон, 1958 год.** К.А. Тейлор и Би.Дж. Томпсон, «Попытка расследования». Экспериментальное распределение интенсивности вблизи фокуса на безошибочных дифракционных картинах круглых и кольцевых зрачков», *Дж. Опция Соц. Являюсь*, том. 48, нет. 11, стр. 844-850, ноябрь 1958 г.
- Теребеж 1990г.** В.Ю. Теребеж, «Новое Рончи». **Нулевой** Тест на зеркала». *Небо и телескоп* (Кочерга), сентябрь 1990 г.
- Тексеро 1984 г.** Жан Тексеро, *Как сделать телескоп*, 2-е изд. (впервые опубликовано в 1951 г.), Уиллманн-Белл, Инк., 1984.
- Твайман 1988 г.Ф.** Твайман, *Изготовление призм и линз*, 2-е изд. (первоначально опубликовано в 1952 г.), часть о шероховатости взята из работы Тексеро, Адама Хилгера, Бристоль, 1988.
- ван де Хюлст 1981 г.** ХК ван де Хюлст, *Рассеяние света мелкими частицами*, п. 107, Дувр Публикации, 1981 г. (первоначально появилось в 1957 г.).
- Ван Нуланд 1983 г.** Дж. Ван Нуланд, «Еще об аподизации», Письма, *Изготовление телескопа № 21*, п. 4, зима 1983 года.
- Уокер 1977 г.** Джерл Уокер, *Летающий цирк физики с ответами*, проблемы. 4-13, 4-15, «Уайли и сыновья», Нью-Йорк, 1977 год.
- Уэлфорд 1960 г.** У.Т. Уэлфорд, «О предельной чувствительности звездного теста для оптических систем». Инструменты», *Журнал Оптического общества Америки*, том. 50, нет. 1, стр. 21-23, январь 1960 г.
- Уэлфорд 1978 г.** У.Т. Уэлфорд, «Звездные испытания», гл. 11 из *Тестирование оптического цеха*, ред. Д. Малакара, стр. 351-379, John Wiley and Sons, Нью-Йорк, 1978.
- Змек 1993 г.** В. П. Змек, «Практические правила для планетарных телескопов-I», *Небо и телескоп* (Изготовление телескопов), июль 1993 г.; «Практические правила для планетарных телескопов-II», *Небо и телескоп*, Сентябрь 1993 года.

Индекс

А

функция аберрации.
астигматизм 254
средняя шероховатость 241
несоосность 106
щипать 147
мелкомасштабная шероховатость 247
сферическая аберрация 174
ламповые токи 139
турбулентность 131
перевернутый край 211
зоны 205
размещение 19, 79, 93
баян 91
ахроматическая линза 222
ахроматизм, Исаак Ньютон 222
совокупная ошибка 265
воздух, показатель преломления
129, диск Эйри 11, 334
выравнивание 17, 22, 104, 266
Ньютониан 109
рефрактор 121
Шмидт-Кассегрен 125
диафрагма, как основной фильтр 37
Программа APERTURE 307, 316
апохроматический объектив 226
аподизация 160—166
искусственный источник 77, 82
ночью 90
цветокоррекция 90
недостатки 83
расстояние 83
расстояние для Шмидта-Кассегрена
86
пример 97-100
освещение фонариком 90
наведенная сферическая аберрация
83 изменение разделения 98
монтаж 91
размер 86
размер, отраженный в сфере 89, 339

искусственный источник (продолжение)
сферический отражатель 88
асферическая фигура 202
астигматизм 5, 32, 251
диагностика причины 258
в звездном тесте 90, 258-260
АСИММпрограмма 317
атмосферная турбулентность
129 аудиоаналогия 38

Б

полосовой пропускание, оптическая система
46 черные сферы 90
краевая задача 58, 308

С

методы расчета 307
расчет Кассегрена 171
причинность 62
каустический тест 284
каустик 170
Зеркала Сераволо 267
хроматическая аберрация 219
окулярь 232
в глазу 231
почистить оптику 168
зажимы, зеркало 25, 114,
коллимационные 17, 22, 104
цветные фильтры в звездном тесте 93, 227
кома 23, 106
смесь с астигматизмом 104
жаловаться, как 273
изменение контраста 52
конвективная ячейка 131
координаты света 57
циклоида, куртат 147, 345
Д
Далл-Киркхэм-Кассегрен 171

Условия Данжона и Кудера 8

Критерий Дауэса 286

ошибка децентрирования 228

расстояние расфокусировки 20, 78, 337

расфокусировка, четкость 2, aberrация

дефокусировки 75, 173 деформированная

оптика 145

глубина резкости 79

диагональный размер, чрезмерное отверждение 156

дифракционные кольца 10

дифракция и фокусировка 65

дифракция 55

дисперсия 220

Добсон, Джон 88

собачье печенье 236

пыль и царапины 166

Е

электронная поп-музыка 61

Коэффициент окружающей энергии (EER) 197

окружающая энергия

вторичная обструкция 154

сферическая aberrация 177

пример звездных тестов

8" f/6 Ньютоновский 94

16 дюймов f/4 Ньютона 97

Апохроматический рефрактор 6 дюймов f/12 98

8" f/10 глазок Шмидта-Кассегрена 100,

автоматическая фокусировка 93

шероховатость 240

очки 18, 252

движение окуляра, 77-81

внутренние механизмы фокусировки 81

таблица из 80

окуляр, в звездном тесте 17

Ф

быстрое преобразование Фурье 314

полевая остановка 9

фильтр цветной 93, 98, 227

тонкая настройка 117

точка обзора фиксированного окуляра 9

исправление дефектов телескопа 269

люминесцентные лампы 41

размещение фокуса 19, 79, 93 положение

фокуса с искусственным источником

83-86

трик с фокусировкой 93

фокус, типы 174

движение фокуса, в звездном тесте 18, 78 ошибка

фокусировки, сначала исправить 272

Тест Фуко 167, 239, 278

Фурье 62, 71

Фраунгофера 26

приближение 310

строки 224

Аппроксимация Френеля 310

Зоны Френеля 66-70

Формула Френеля-Кирхгофа 308

Г

Гауссова передача зрачка 161

геометрический тест Ронки 289-297

геометрическая тень 56

скрежетание, астигматизм 5

гитарная струна 70

Н

Холл, Честер Мур 223

Тест Гартмана 284

Неопределенность Гейзенберга 60 HST

(Космический телескоп Хаббл) 172

Гюйгенс, Кристиан 63

Принцип Гюйгенса-Френеля 307

Гц (герц), определение 39

Я

оценка изображения, слепой тест 267

обработка изображений 41

изображение как воспроизведение 35

функция импульсной характеристики 62

принцип неопределенности 60

интерферометрические тесты 298

переливчатость 298

К

тест на острие ножа 167, 239, 278

Л

Разметка кадров изображения 333

расположение, в звездном тесте 17, 138,

243 продольный срез 73, 187-190 фильтры

нижних частот 42

М

увеличение как передискретизация 42

телескоп Максудова 171

карты и ошибка поверхности

236 Допуск Маршала 7, 9, 238

микрорябь 237, 246

микроскопия 38

микроволновая печь 72

фрактал смещения средней точки
 алгоритм 131
 перекося 17, 22, 104, 109, 121,
 125, 266
 MTF (функция передачи модуляции) 9,
 46
 как автокорреляция 315
 астигматизм 256
 определение 47
 расфокусировка 51
 сферическая aberrация высшего порядка
 194
 сферическая aberrация низшего порядка
 176
 среднемасштабная шероховатость 242
 множественные оптические проблемы 52, 267
 препятствие 155
 симметричных апертур 313
 пережатая оптика 147
 мелкие неровности 247
 пауки 158
 токи трубки 140
 турбулентность 136
 перевернутый край 211
 зоны 205

мифология телескопов 15

Н

Рефлектор Ньютона, качество 28
 узлы и пучности 70—74
 нулевой тест 172, 304
 нумерация в кадрах изображения 333
 числовая модель, ограничения 320

маска обструкции, 33% 94
 обструкция 20, 153
 толерантность 155

смещенный, диагональный 114
 заказ диагностики 19 OTF/MTF как
 автокорреляция 315 другие тесты
 277
 расфокусировка, чрезмерная
 коррекция четкости 2 171
 передискретизация 41

П

параболоид 171
 идеальная оптика, дифракционная картина
 характеристики 11, 14
 перспективное сжатие 38

фотопластинки 284
 физическая оптика 15
 Шкала зрения Пикеринга 136
 заземленная оптика 25, 145
 пинч
 горизонтальный звездный тест 92 в
 тонкозеркальных отражателях 151
 дырочки 83-88
 подача
 принципы работы 5
 физические характеристики 5
 полировка 28
 функция разброса точек 62
 точно-дифракционный интерферометр 302

Пуассона, СД 21
 энергосбережение 11
 первичная пульсация 236
 печать кадров изображения 324
 распространение, определение 63
 функция зрачка 74
 ученики, гауссиан 161
 ученики, суперразрешение 160

Р

радиальная мишень 52
 радиаторы 64
 радиотелескоп 40
 трассировка лучей (геометрическая оптика) 22,
 56 Критерий Рэлея 286
 Допуск Рэлея 6
 Неустойчивость Рэлея-Тейлора 130
 зеркала заднего вида 89
 эффект красной точки 230 преломляющая/
 отражающая оптика 26 средства коррекции,
 загнутый край 217 остаточная хроматическая
 aberrация 224 разрешение, звук 39

тест разрешающей способности 286
 резонанс, причина дисперсии 224 Ричи-
 Кретьена-Кассегрена 172 тест Ронки
 289-297
 шероховатая поверхность 28, 235
 шероховатость на глазу 240 чешуя
 шероховатости 238

С

сагитта 78, 337
 ошибки выборки в расчетах 320
 масштабированная точность волнового фронта 3
 Шифшпиглер 79
 Шмидт-Кассегрен 171
 царапины и пыль 166

вторичные источники 64
вторичный спектр 224
 «видящие» фильтры 165
 чувствительность звездчатого теста 78,
 81-82, затемнение 160
 усадка при охлаждении 146,
 отношение сигнал/шум (SNR) 43, 167,
249
 подпись устройства воспроизведения 62
 простые линзы 219
 модификация сайта 14, 138
 выбор сайта 91
 свечение неба 38
 моментальный тест 18, 93, 98
 SNR 43, 167, 249
 мыльные пузыри 298
 Критерий Воробья 287 пространственно-
 частотная характеристика 45
 сферическая аберрация 26, 170, 174
 сферический отражатель как искусственный
 источник 88
пауки 157-160
 набор фильтров 35
 звезд, как мишень 18
 звездный тест 17
 Критерий 2:1 для сферических
 аберрация 190-192
 апохроматы и продвинутые
 дизайн 231
 астигматизм 258
 хроматическая аберрация 227
 обычные дублеты 229 вариант
 Эллисона 179 гауссов зрачок 163
 сферическая аберрация высшего порядка
194
 неравенства фокуса 311 сферическая
 аберрация низкого порядка
178
 средняя шероховатость 243
 препятствие 155
 пережатая оптика 148
 Паучья дифракция 159
 ламповые токи 142
 турбулентность 136
 перевернутый край 211
зоны 207
 этикет стар-тест 273 перетянутая
 оптика 25, 145 коэффициент
 Штреля 9, 148, 198, 238 сабвуфер
 40
 деформация поверхности при микроскопическом
 масштаб 4

шероховатость поверхности 235

Т

температурные воздействия 25,
 187 тор 252
передача, отрицательные
 161 токи трубки 24, 139
 ячейки турбулентности, источник
 23 турбулентность, основа 91, 138
 турбулентность 23, 129
 загнутый край 5, 31, 203, 209
 мерцающий 24

Ты

недокоррекция 171

В

виньетирование 85

Вт

«теплые» цвета 41
 волновая сумма 67
 ошибка волнового фронта, мера качества 6,
 ошибка клина 228
 Правило 20 фокусных расстояний Уэлфорда 83
 Картина дифракции белого света 13 Тест на
 проволоке 284

Z

Полиномы Цернике 174
 зональная аберрация 31, 201

Дополнительное программное обеспечение

АПЕРТУРА это программа IBM-PC, написанная Диком Сьютером для расчета большинства дифракционных картин, представленных в его книге *Астрономические телескопы для испытания звезд*. С АПЕРТУРА вы можете исследовать наиболее распространенные аберрации, включая сферические аберрации (низкого и высокого порядка), зоны и загнутые края. Он легко расфокусирует изображение, чтобы показать фактическое воспринимаемое поведение по обе стороны от фокуса. Пользователи могут указать множество моделей передачи, таких как обструкция и аподизация зрачков. Если множества встроенных аберраций и передач недостаточно, можно сконструировать свои собственные. Продается только покупателям книги.

АПЕРТУРА имеет меньше приближений, чем процедуры трассировки лучей. Он показывает распространение энергии в диск Эйри, вызванное волновой природой света. АПЕРТУРА отображает изображения с плавной 256-уровневой серой шкалой (только мониторы VGA). Он также выполняет множество других вспомогательных вычислений, включая функцию оптической передачи, фазу поля и функцию окруженной энергии (мониторы, совместимые с EGA, VGA и Hercules).

АПЕРТУРА принимает входные данные от программы сокращения тестов Фуко ADMIR компании Suiteer (также доступной от Willmann-Bell за 19,95 долларов США плюс 1,00 доллара за обработку внутренних заказов), так что вы можете протестировать несовершенный парабоид, а затем передать результаты непосредственно в АПЕРТУРА. Таким образом, вы можете получить фактическую дифракционную картину, создаваемую этой оптической поверхностью, а также ее способность сохранять контраст. Предоставляется служебная программа PostScript для создания изображений того же типа, что и в книге.

АПЕРТУРА работает на машине MS-DOS 286, хотя лучше всего на процессоре 386 или выше. Рекомендуется использовать сопроцессор. Он поддерживает мониторы, совместимые с EGA и Hercules, но для дисплеев с оттенками серого требуются плата VGA и цветной монитор.

Проверните страницу для формы заказа.

Форма заказа

О APERTURE для IBM-PC по цене 24,95 доллара США за штуку. \$ _____
 О 5,25 дюйма 360 К О 3,5 дюйма 720 К

О ADMIR для IBM-PC по цене 19,95 долларов США за штуку. \$ _____
 О 5,25 дюйма 360 К О 3,5 дюйма 720 К

Умение обращаться

1.00

ОБЩИЙ \$ _____

Я хочу оплатить: О Чек О
 Денежный перевод О Visa
 О MasterCard О Американ Экспресс

Номер карты _____

Срок действия карты _____

Подпись _____

Имя (пожалуйста, распечатайте) _____

Улица _____

Город, штат, почтовый индекс _____

Уиллманн-Белл, Инк.

Почтовый ящик 35025

Ричмонд, Вирджиния, 23235 Голос

(804) 320-7016 ФАКС (804) 272-5920

Цены могут быть изменены без предварительного уведомления

Серийный номер этой книги: _____