



О.И. Шанин

Адаптивные оптические системы  
коррекции наклонов.  
Резонансная адаптивная оптика

Техносфера  
Москва  
2013

**УДК 621.373.8**  
**ББК 22.343**  
**Ш20**

**Ш20 Шанин О.И.**

**Адаптивные оптические системы коррекции наклонов.**  
**Резонансная адаптивная оптика. — Москва: Техносфера, 2013. — 296 с.**  
**ISBN 978-5-94836-347-9**

В книге изложены физические, расчетно-теоретические и технические вопросы проектирования наиболее простых, на первый взгляд, адаптивных оптических систем — систем коррекции наклонов. Сравнительная идеологическая простота рассмотренных систем довольно сильно осложняется массой деталей и тонкостей, которые нужно учитывать при разработке конкретных приложений. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Анализируются проблемы измерения углов наклона световых волн. Особое внимание уделено наблюдению слабоконтрастных сигналов с помощью матричных приемников.

На примере системы коррекции наклонов освещается новый класс адаптивной оптики — резонансная адаптивная оптика.

Книга предназначена для специалистов в области оптики, радиоэлектроники и точного приборостроения. Может быть полезна научным работникам, аспирантам и студентам старших курсов вузов соответствующих специальностей.

**УДК 621.373.8**  
**ББК 22.34**

© 2013, О.И.Шанин  
© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

При оформлении первой страницы обложки использована фотография с сайта обсерватории Keck <http://keckobservatory.org/>

**ISBN 978-5-94836-347-9**

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	<b>6</b>
<b>Введение</b> .....	<b>8</b>
В.1. Обзор содержания книги .....	8
В.2. Основные идеи резонансной адаптивной оптики .....	10
В.3. Развитие адаптивной оптики .....	11
В.4. Краткая библиография основных работ по адаптивной оптике и смежным с ней дисциплинам .....	13
<b>ЧАСТЬ I. АДАПТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ</b> .....	<b>22</b>
<b>Глава 1. Краткие сведения о коррекции наклонов волнового фронта</b> .....	<b>22</b>
1.1. Источники фазовых искажений при распространении света .....	22
1.2. Системы коррекции и корректоры наклонов .....	36
Заключение .....	50
Литература к главе 1 .....	51
<b>Глава 2. Измерение наклонов волнового фронта и управление</b> .....	<b>54</b>
2.1. Принципы измерений и работы датчиков наклонов .....	54
2.2. Проблемы измерений наклонов ВФ в сумеречных и дневных условиях .....	66
2.2.1. Яркость сигнала и фона .....	71
2.2.2. Особенности регистрации светового сигнала матричными приемниками и проникающая способность систем на их основе .....	81
2.2.3. О возможности концентрации полезного сигнала .....	89
2.3. Пространственная фильтрация как средство повышения отношения сигнал—шум .....	92
2.3.1. Пространственная фильтрация в задаче измерения волнового фронта .....	93
2.3.2. Фильтрация и самообучение при измерениях волнового фронта по локальным наклонам .....	96
2.4. Некоторые примеры сенсоров и датчиков наклонов .....	101
2.5. Управление в системе коррекции наклонов .....	109
2.6. Заключение и выводы .....	116
Литература к главе 2 .....	117
<b>Глава 3. Приводы и актюаторы, используемые в корректорах наклонов</b> .....	<b>122</b>
3.1. Краткий обзор приводов и актюаторов .....	122
3.2. Диссипация энергии приводом при компенсации турбулентных флуктуаций фазы .....	129
3.3. Тепловая модель привода .....	137
3.3.1. Анализ особенностей модели .....	137
3.3.2. Расчет температуры привода .....	139
3.3.3. Экспериментальное исследование тепловых характеристик привода .....	151
3.3.3.1. Диссипация энергии приводом .....	152
3.3.3.2. Тепло- и электрофизические характеристики пьезокерамики и пьезопривода .....	154

3.3.3.3. Термическое расширение привода .....	158
3.4. Заключение и выводы .....	160
Литература к главе 3 .....	163
<b>ЧАСТЬ II. РЕЗОНАНСНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИКА .....</b>	<b>166</b>
Введение .....	166
<b>Глава 4. Корректоры наклонов .....</b>	<b>168</b>
4.1. Математическая модель и теоретические исследования корректоров наклонов .....	168
4.2. Экспериментальные исследования корректоров наклонов .....	188
4.2.1. Характеристики используемых в корректорах наклонов актуаторов ....	188
4.2.2. Чувствительность корректора наклонов .....	188
4.2.3. Электромеханический гистерезис корректора наклонов .....	191
4.2.4. Определение ошибки установки углов корректора наклонов.....	193
4.2.5. Амплитудно- и фазочастотные характеристики корректора наклонов при различных условиях.....	194
4.2.6. Некоторые особенности работы корректора наклонов в составе адаптивной системы .....	197
4.2.7. Выводы .....	203
Литература к главе 4 .....	204
<b>Глава 5. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов .....</b>	<b>205</b>
5.1. Математическая модель и теоретический анализ адаптивной оптической системы коррекции наклонов.....	205
5.1.1. Модель системы управления.....	206
5.1.1.1. Описание и составление модели системы управления.....	206
5.1.1.2. Особенности цифровой системы управления.....	217
5.1.1.2.1. Представление ПИД-регулятора в конечных разностях .....	217
5.1.1.2.2. Выбор интервала квантования.....	218
5.1.1.2.3. Подключение интегрального и дифференциального регуляторов .....	220
5.1.2. Анализ системы управления .....	222
5.1.2.1. Анализ корректора наклонов.....	222
5.1.2.2. Переходные процессы в системе управления .....	224
5.1.2.3. Влияние частоты считывания кадров на работу системы управления .....	225
5.1.2.4. Влияние фазочастотной характеристики корректора наклонов на работу системы управления .....	228
5.1.2.5. Влияние времени задержки на работу системы управления .....	229
5.1.3. Задача оптимизации параметров адаптивной оптической системы коррекции наклонов .....	229
5.1.4. Сопоставление полученных результатов с экспериментом.....	231
5.1.5. Особенности работы системы в реальных условиях зашумленного и/или слабого сигнала .....	236
5.2. Исследования и испытания адаптивных оптических систем коррекции наклонов.....	240
5.2.1. Описание и анализ систем управления .....	241

5.2.2. Амплитудно-частотная характеристика корректора наклонов .....	244
5.2.3. Определение времен задержки и переходных характеристик элементов экспериментальной системы .....	245
5.2.3.1. Определение времени задержки .....	245
5.2.3.2. Определение переходных процессов в системе управления .....	247
5.2.4. Зависимость частоты коэффициента усиления начала и частоты автоколебаний в системе от частоты считывания кадров.....	250
5.2.5. Определение интегральных характеристик системы управления .....	251
5.2.6. Обсуждение полученных результатов.....	257
5.3. Примеры применения АОС коррекции наклонов.....	261
5.3.1. Компенсация приземной турбулентности .....	261
5.3.1.1. Описание экспериментальной АОС и методик измерений .....	261
5.3.1.2. Сопоставление экспериментальных и расчетных СКО фазовых искажений на трассе.....	263
5.3.1.3. Испытание АОС на турбулентной трассе.....	265
5.3.1.4. Влияние коэффициента усиления и частоты считывания кадров на уровень эффективности коррекции системы.....	269
5.3.2. Система коррекции наклонов на основе спецвычислителя.....	270
5.3.3. Применение системы коррекции наклонов для изучения проблем регистрации слабоконтрастных объектов .....	271
Заключение.....	278
Литература к главе 5 .....	278
<b>Заключение.....</b>	<b>281</b>
<b>Перечень принятых сокращений .....</b>	<b>284</b>
<b>Указатель важнейших обозначений .....</b>	<b>286</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>288</b>

*Основная задача любой теории... — сделать так,  
чтобы базовые элементы были максимально просты  
и так малочисленны, как только возможно  
без ущерба для адекватного представления... о том,  
что мы наблюдаем на практике.*  
АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

## Предисловие

Адаптивная оптика в настоящее время демонстрирует свою зрелость в различных приложениях. Уже никого не нужно убеждать в целесообразности ее применения в разнообразных приборах и устройствах. Вместе с тем создаваемые адаптивные оптические системы до сих пор остаются довольно сложными и эксклюзивными в каждом конкретном случае, так как базируются на применении самых последних достижений в различных областях науки и техники. Необходимость интеграции сложных элементов в непростые системы породила, как и в других областях науки и техники, идею системной интеграции. Для решения возникающих проблем при создании уникальных адаптивных оптических систем, например для больших наземных телескопов, работают международные коллективы. Именно этими причинами, по-видимому, объясняется тот факт, что адаптивная оптика до сих пор остается во многом областью приложения сил ученых. Научная идеология создания адаптивных оптических систем продолжает развиваться и получает отражение в обобщениях (см. список литературы к введению), дающих представление как о физических принципах адаптивной оптики, так и о разнообразных ее приложениях.

В своих ранних изданиях (книге «Адаптивная оптика» и публикации «Управляемые оптические зеркала» в сборнике «Итоги науки и техники» из серии «Управление пространственной структурой оптического излучения» соответственно 1990 и 1991 года), как нам кажется, удалось обобщить технические аспекты развития адаптивной оптики на тот период времени. Более поздняя попытка такого обобщения (в книге «Адаптивная оптика в приборах и устройствах» 2005 года издания) привела к значительному росту объема издания, несмотря на то, что о последних достижениях адаптивной оптики в ней сообщалось в конспективном плане. Эта книга относится к изложению скорее технических основ и принципов адаптивной оптики, нежели чем деталей, и носит характер методического руководства по проектированию адаптивных систем. Дальнейшие обобщения научного и инженерного опыта адаптивной оптики, несомненно, приведут к более обширным энциклопедическим изданиям. Однако перед этим должны появиться издания, направленные на рассмотрение более узких областей адаптивной оптики, но на более детальном инженерном уровне. Автор надеется, что настоящая книга станет очередной в серии таких проблемно-ориентированных изданий.

Изложение в книге построено по схеме, традиционной для многих книг по адаптивной оптике. Во введении приводится краткий историче-

ский экскурс по изданиям, обобщающим к настоящему времени результаты исследований различных разделов адаптивной оптики, и приводится их, на взгляд автора, достаточный, но далеко не полный список. В первой части приведены общие сведения, особенности и примеры применения адаптивных оптических систем коррекции наклонов. В первой главе даются понятия о простейшей и, как правило, преобладающей во многих оптических системах аберрации волнового фронта светового пучка — наклонах волнового фронта, а также способах и устройствах для их коррекции. Вторая глава посвящена техническим аспектам измерения и датчикам наклонов, высокочувствительным сенсорам и основам пропорционально-интегрально-дифференциального управления. Особое внимание уделено регистрации слабых световых сигналов в сумеречных и дневных условиях с помощью матричных приемников. В последние 20–25 лет матричные приемники на основе ПЗС- и КМОП-технологий чрезвычайно динамично развиваются. Вместе с тем отечественных публикаций по этой проблеме явно недостаточно. Детектируемое изменение сигнала определяет уровень проникающей способности системы. В следующей главе детально рассмотрены исполнительные элементы корректоров наклонов — актюаторы, и приводятся особенности их работы в составе управляемых зеркал. Получены выражения для связи расширения привода при работе системы коррекции на турбулентной трассе, а также экспериментальные данные по свойствам и характеристикам пьезокерамики и приводов.

Вторая часть книги посвящена новому направлению в адаптивной оптике — резонансной адаптивной оптике. На примере системы коррекции наклонов излагаются ее основные принципы. В этой связи в четвертой главе рассматриваются широкоапертурные корректоры наклонов, отличающиеся от традиционных чрезвычайно низким уровнем частот первого механического резонанса и большой по сравнению с приводом инерционной массой. В пятой главе излагаются результаты исследований адаптивных оптических систем на основе широкоапертурных корректоров наклонов. Эти исследования проведены особенно тщательно в лабораторных условиях и на коротких горизонтальных трассах.

Для лучшего понимания представленного материала целесообразно ознакомиться с основами адаптивной оптики по одной из первых двух-трех десятков книг, приведенных в списке литературы к введению.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории «Адаптивная оптика» ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» за полученные за время совместной работы бесценные знания и опыт, частично нашедшие свое отражение в данной книге. Часть приведенных экспериментальных результатов получена Пикулевым С.В. и Щипалкиным В.И. Конструкции корректоров наклонов разработаны Черных А.В.

Автор будет признателен за замечания и предложения, которые сделают специалисты по прочтении данной книги.

# Введение

## В.1. Обзор содержания книги

Идея коррекции волнового фронта, приходящего от астрономических объектов через турбулентную атмосферу света, высказанная Г. Бэбкоком [1] и В.П. Линником [2] в 50-е годы прошлого столетия, послужила толчком для развития адаптивной оптики. Необходимо отметить, что как Г. Бэбкок, так и В.П. Линник обращали внимание в первую очередь на коррекцию наклонов волнового фронта.

Адаптивная оптика продолжает бурно развиваться и в настоящее время используется в самых различных приложениях — от лазерного термоядерного синтеза до офтальмологии.

В этой области накоплен обширный опыт, который обобщен в опубликованных многочисленных статьях и книгах по адаптивной оптике как у нас в стране, так и за рубежом. К сожалению, обобщению инженерного опыта в области адаптивной оптики посвящено не так много публикаций. По-видимому, именно поэтому вплоть до настоящего времени при создании адаптивных оптических систем (АОС) инженеры-проектировщики испытывают затруднения, хотя, как правило, необходимые им знания и данные имеются в литературе. Возникают также вопросы применения данных, которые в ряде случаев затруднительно использовать. Настоящая работа написана для инженеров и призвана восполнить эти недостатки для ограниченного класса адаптивных систем — адаптивных оптических систем коррекции наклонов волнового фронта. Следует отметить, что практически все идеи, сформированные в линейной адаптивной оптике в прошлом столетии, в последние 15 лет получают новое современное воплощение в связи с бурным развитием вычислительной техники, электроники и микрооптики. Появившиеся за последние 20 лет возможности позволяют на практике проверить ранее разработанные идеи, как правило, подкрепленные ранее положительными результатами численных экспериментов.

Несмотря на то, что линейная адаптивная оптика является на сегодня вполне сложившейся наукой, проникшей во многие прикладные области, здесь еще открыто огромное поле для деятельности и неожиданных находок. Одна из них представлена в настоящей книге.

В традиционной линейной адаптивной оптике общепринято, что частота первого резонанса исполнительного элемента (в данном случае корректора наклонов) должна как минимум на порядок превышать ширину полосы коррекции адаптивной системы. Это условие чрезвычайно трудно реализовать на практике, особенно в цифровых адаптивных системах, так как кор-



ректор «ощущает» еще два более высокочастотных сигнала: сигнал управления, как правило, следующий с частотой считывания кадров датчиком наклонов (по канонам частота этого сигнала должна быть не менее чем в шесть раз выше контролируемой ширины полосы системы), и шумовой сигнал, связанный с дискретностью подаваемого на приводы корректора напряжения. Создание высокочастотных (с частотой  $\sim 10$  кГц и более) корректоров для силового излучения с большой апертурой — чрезвычайно сложная техническая проблема. В нашем случае используются корректоры с очень низкими резонансными частотами ( $\sim$  сотни герц), причем их резонансные свойства (амплитудные и фазовые) используются для повышения коэффициента усиления в цепи обратной связи, что равнозначно повышению эффективности коррекции. За счет этого удалось повысить эффективность системы коррекции наклонов до пяти раз и достичь остаточной ошибки коррекции около половины угловой секунды.

Резонансное повышение коэффициента усиления в адаптивных оптических системах, работающих со слабыми световыми сигналами, позволяет сократить время накопления сигнала на датчике и тем самым повысить быстродействие рассматриваемых систем.

В работе также детально рассмотрено тепловое поведение исполнительного элемента адаптивного зеркала — пьезоэлектрического привода при компенсации случайно-неоднородных флуктуаций фазы, связанных, например, с атмосферной турбулентностью. Получены аналитические зависимости для расчета диссипации энергии пьезоприводом, его температурного состояния и терморасширения (геометрической стабильности). Замыкание математических моделей осуществлено при использовании экспериментальных данных по тепло- и электрофизическим свойствам пьезокерамики.

Несмотря на то, что в работе изложен весь комплекс вопросов, связанных с адаптивными системами коррекции наклонов, основное внимание уделено исполнительным элементам — корректорам наклонов и собственно системам коррекции.

Особенностью настоящей работы также является наличие полученных простых зависимостей, позволяющих провести экспресс-оценки тех или иных параметров.

Полученные результаты для системы коррекции наклонов могут быть распространены на многоканальные адаптивные системы. Адаптивная оптическая система коррекции наклонов замечательна тем, что в ней сравнительно легко и наглядно получают результаты, обладающие большей общностью. Наиболее сложным объектом для распространения полученных результатов является адаптивное зеркало, которое в данном приложении выглядит довольно просто.

Практически все рассмотренные в книге теоретические вопросы подкреплены обширным экспериментальным материалом, как обзорным, так и оригинальным.

Первая часть книги носит более обзорный характер и служит введением в адаптивную коррекцию наклонов волнового фронта светового пучка. Вторая часть — полностью оригинальная и на основе коррекции наклонов демонстрирует основные идеи резонансной адаптивной оптики.

## **В.2. Основные идеи резонансной адаптивной оптики**

В традиционной (классической) адаптивной оптике существует некоторое табу на использование в контурах управления исполнительных элементов с низкой частотой первого механического резонанса. В соответствии с устойчивыми рекомендациями [4, 14 и др.] отношение частоты первого резонанса адаптивного зеркала должно примерно на порядок превышать ширину полосы контура управления. Действительно, при работе на окolorезонансных частотах в цепи обратной связи возникает режим автоколебаний, который определяется резонансными явлениями в зеркале. В этом случае потеря устойчивости контура управления диктуется именно механическими свойствами, а вовсе не свойствами электронного контура управления.

Опыт эксплуатации механических систем [120] показывает, что резонансные явления зачастую не являются ограничением при их работе. Важно не иметь сильного резонанса, не попадать точно на резонансную частоту и не находиться в точке резонанса долго. Поэтому использование в адаптивных системах элементов с низкой частотой первого резонанса принципиально возможно. Однако при этом эффективность системы оказывается низкой, так как мы не можем увеличивать коэффициент усиления в электронной цепи обратной связи, в связи с чем переход поверхности зеркала в регулируемое положение занимает длительное время (совершается за большое количество итераций с малым шагом). Вместе с тем наблюдаемое резонансное увеличение амплитуды колебаний оптической поверхности может привести к желаемому повышению эффективности контура обратной связи. Если возбуждать зеркало с окolorезонансной частотой, то принципиально можно достичь увеличения амплитуды колебаний поверхности.

Адаптивная система фазового сопряжения состоит из датчика волнового фронта (или датчика наклонов в случае коррекции системой только наклонов волнового фронта), системы управления (в связи с достаточным быстродействием и памятью, а также наличием быстрых интерфейсов роль системы управления обычно выполняет компьютер), усилительной аппаратуры и адаптивного зеркала. Датчик с определенной частотой считывает волновой фронт, а система управления в реальном времени, как прави-

ло, с этой же частотой передает сигналы управления на исполнительные элементы зеркала — актюаторы. Коэффициент усиления в цепи обратной связи ограничен возникновением явления автоколебаний в этой цепи. Для устойчивой работы системы полагают коэффициент усиления равным примерно 60% от коэффициента усиления, при котором система переходит в режим автоколебаний [например, 48 в гл. 2]. Однако и при этом ограничении наблюдается перерегулирование системы и длительный переходный процесс. Чтобы уменьшить эти явления, в контур управления вводят интегральное и дифференциальное звенья. Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы) распространены и широко используются в технике. В нашем случае возбуждение системы управления происходит в связи с механическим резонансом зеркала, а не с большим коэффициентом усиления в электронной цепи, поэтому этот коэффициент, как правило, не высок и явления перерегулирования не наблюдаются, то есть интегральное и дифференциальное звенья не нужны. Остается лишь пропорциональное усиление и управление, что упрощает систему и изначально повышает ее устойчивость.

Очевидно, что предложенная система в равной степени будет работать с исполнительными механическими элементами, имеющими любые значения первой резонансной частоты.

### **В.3. Развитие адаптивной оптики**

Практически в каждой книге по адаптивной оптике существует раздел, посвященный истории ее рождения и развития. В настоящем разделе проследим историю ее развития на основе обзора основных публикаций по данному направлению.

Список литературы к введению включает в основном книги, а также оригинальные статьи, касающиеся адаптивной оптики в целом, и составлен в историческом аспекте по мере их публикации. Первая генерация выхода книг относится к середине 80-х — началу 90-х годов прошлого столетия, и это в основном труды советских авторов. Нельзя не отметить ряд фундаментальных работ, лежащих в основе развития адаптивной оптики. Это прежде всего статьи Г. Бэбкока и В.П. Линника [1, 2] о принципиальной возможности компенсации фазовых аберраций при изучении звезд. В основе изучения закономерностей распространения света в атмосфере и становления атмосферной адаптивной оптики лежат труды советских ученых — Колмогорова А.Н., Обухова А.М., Татарского В.И., Зуева В.Е., Миронова В.Л., Лукина В.П. и многих других. Из зарубежных исследователей следует отметить фундаментальные работы Д. Харди, Д. Фрида, Р. Нолля, Д. Гринвуда и др.

Этапным событием для начала публикаций работ по адаптивной оптике в Советском Союзе послужили публикации Д. Харди [3] и сборник статей [4]. Вместе с тем систематизированные зарубежные публикации (в том числе и монография Д. Харди [14]) появляются лишь в конце 90-х — начале 2000-х годов. Исключение составляет книга Р. Тайсона [13] «Принципы адаптивной оптики», которая увидела свет в 1991 году. Начиная приблизительно с 2005 г. наблюдается очередная волна изданий книг по адаптивной астрономической и лазерной оптике и смежным вопросам. Следует обратить особое внимание на проникновение адаптивной оптики в офтальмологию, чему посвящена многочисленная литература, экспоненциальный рост числа публикаций в этой области отмечается примерно с 1995 года. Обобщение проведенных работ изложено в [161, 162]. Наряду с изданиями, освещающими принципы и схемы устройств адаптивной оптики, существует целый ряд проблемно-ориентированных изданий по применению адаптивной оптики в различных типах оптических устройств (например [5, 7, 14, 16, 22, 161, 165] и др.). В последние 20 лет адаптивная оптика активно развивалась за рубежом, в связи с чем опубликовано достаточно много книг, малодоступных российскому читателю. В третьем издании книги Р. Тайсона [26], опубликованном в сентябре 2010 года, содержится наиболее обширная библиография, посвященная адаптивной оптике, которая включает в себя более 900 источников, в основном иностранных. Общий же список публикаций по адаптивной оптике на сегодня намного превышает 10000 наименований. В России вопросам адаптивной оптики за прошедшие 20 лет также уделялось определенное внимание. Эта тематика включалась в программы семинаров и конференций различного уровня. Среди них такие международные конференции, как «Оптика лазеров», Харитоновские чтения и другие. Особенно следует отметить прошедший в 2011 году в рамках международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» семинар «Применение адаптивной оптики в мощных лазерах», на котором были представлены в основном работы отечественных исследователей [163, 164].

Кроме того, адаптивная оптика впитала в себя квинтэссенцию многих областей знания и инженерных дисциплин. Поэтому в приведенном списке литературы имеются также основные публикации, освещающие основы и отдельные вопросы этих областей знаний и дисциплин.

Библиографии публикаций, касающихся предмета настоящей книги, приведены в конце каждой главы.

#### **В.4. Краткая библиография основных работ по адаптивной оптике и смежным с ней дисциплинам**

1. Babcock H.W. The Possibility of Compensating Atmospheric Seeing. PASP, 1953, v. 65, p. 229–236.
2. Линник В.П. О принципиальной возможности уменьшения влияния атмосферы на изображение звезды. // Оптика и спектроскопия. — 1957, № 3. С. 401–402.
3. Харди Д.У. Активная оптика: новая техника управления световым пучком. // ТИИЭР. — 1978, т. 66, № 6. — С. 31–85.
4. Адаптивная оптика: Сборник статей, пер. с англ. / Под ред. Витриченко Э.А. — М.: Мир, 1980. — 456 с.
5. Матвеев И.Н., Сафронов А.Н., Троицкий И.Н., Устинов Н.Д. Адаптация в информационных оптических системах. — М.: Радио и связь, 1984. — 344 с.
6. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
7. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. — Новосибирск: Наука, 1986. — 248 с.
8. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. Управляемые оптические системы. — М.: Наука, 1988. — 272 с.
9. Лукьянов Д.И., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы. / Под ред. Лукьянова Д.П. — М.: Радио и связь, 1989. — 240 с.
10. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика. — М.: Радио и связь, 1990. — 112 с.
11. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Управляемые оптические зеркала. // Итоги науки и техники. Сер. «Управление пространственной структурой оптического излучения». Т. 2. — М.: ВИНТИ, 1991. С. 4–55.
12. Стешенко Н.В., Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. // Итоги науки и техники. Сер. «Управление пространственной структурой оптического излучения». Т. 1. — М.: ВИНТИ, 1990. С. 107–167.
13. Tyson R.K. Principles of adaptive optics. San Diego: Academic Press, 1991, 233 p.
14. Hardy J.W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. New York Oxford: Oxford University Press, 1998, 431 p.
15. Tyson R.K. Principles of adaptive optics, 2nd ed. Boston: Academic press, 1998, 345 p.
16. Roddier F. Adaptive Optics in Astronomy. Cambridge: University Press, 1999.

17. Tyson R.K., Frazier B.W. Field Guide to Adaptive Optics. SPIE Press, 1999, 339 p.
18. Adaptive optics engineering handbook. Ed. By Tyson R.K. New York: Dekker, 2000, 333 p.
19. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 212 с.
20. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика в приборах и устройствах. — М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005. — 416 с.
21. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. — Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. — 250 с.
22. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. — Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2005. — 464 с.
23. Teare S.W., Restanio S.R. Introduction in Image Stabilization. SPIE Press Book, TT73, 14 September 2006, 112 p.
24. Лукин В.П. Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере. // УФН, т. 176. — 2006, № 9. С. 1000–1006.
25. Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Адаптивная коррекция тепловых и турбулентных искажений лазерного излучения деформируемым зеркалом. — Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2008. — 152 с.
26. Tyson R.K. Principles of adaptive optics, 3d ed. NY: CRC Press, 2010, 350 p.
27. «Actuator Technology and Application». Proceedings of SPIE, V. 2865, 1996, 130 p.
28. Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы. — Ростов-на-Дону, 2008. — 153 с.
29. Никифоров В.Г. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы: Теория и практика. — М.: ОАО «НИИ «ЭЛПА», 2010. — 68 с.
30. «Adaptive Optical System Technologies». Proceedings of SPIE, V. 3353, 1998, 1228 p.
31. «Adaptive Optical System Technology». Proceedings of SPIE, V. 4007, 2000, 1120 p.
32. «Adaptive Optical System Technologies II». Proceedings of SPIE, V. 4839, 2002, — 1190 p.
33. International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine.
34. Токовинин А.В. Учебное пособие по адаптивной оптике обсерватории Серро Тололо: <http://www.astronet.ru>.
35. Fried D.L. «Limiting Resolution. Looking down through the Atmosphere». JOSA, 56, 1380–1384 (1966).

36. Fried D.L. «Statistics of geometric representation of wavefront distortion» JOSA, 1965, v. 55, № 11, P. 1427–1435.
37. Greenwood D.P. «Bandwidth Specification for Adaptive Optics Systems». JOSA, 67, 390–393 (1977).
38. Greenwood D.P., Fried D.L. «Power Spectra Requirements for Wave-Front-Compensation Systems». JOSA, 66, 193–206 (1976).
39. Noll R.J. «Zernike polynomials and atmospheric turbulence». JOSA, V. 66, № 3, 1976, p. 207.
40. Балаховская Т.И., Борисенко В.И., Витриченко Э.А. и др. Скоростной метод Гартмана для задач астрономической адаптивной оптики. // ДАН, т. 274. — 1984, № 5. С. 257–260.
41. Ляхов Д.М., Шанин О.И. Оптимальное управление формой оптической поверхности гибкого зеркала. // Известия РАН. Сер. Физическая. Т. 39. — 1995, № 6. С. 55–61.
42. Алиханов А.Н., Берченко Е.А., Киселев В.Ю. и др. Деформируемые зеркала для силовых и информационных лазерных систем. // Лазерно-оптические системы и технологии. — Academy of Sciences Fiszero 14, PL 80–952, Gdansk, Poland, 2009. С. 54–58.
43. Смит Д.К. Распространение мощного лазерного излучения. Тепловое искажение пучка. // ТИИЭР, Т. 65. — 1977, № 12. С. 59–103.
44. Распространение лазерного пучка в атмосфере. / Под ред. Стробена Д. — М.: Мир, 1981. — 406 с.
45. Воробьев В.В. Тепловое самовоздействие лазерного излучения в атмосфере. Теория и модельный эксперимент. — М.: Наука, 1987. — 199 с.
46. Аксенов В.П., Банах В.А., Валуев В.В., Зуев В.Е., Морозов В.В., Смалихо Н.Н., Цвык Р.Ш. Мощные лазерные пучки в случайно-неоднородной атмосфере. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 341 с.
47. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинирование. — М.: Наука, 1985. — 288 с.
48. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. — М.: Наука, 1985. — 240 с.
49. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. — М.: Наука, 1986. — 136 с.
50. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П. и др. Тепловое самовоздействие световых пучков и методы его компенсации. // Изв. вузов. Радиоп физика, т. 23. — 1980, № 1. С. 5–38.
51. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. — М.: Радио и связь, 1981. — 288 с.
52. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. — М.: Наука, 1983. — 272 с.

53. Казарян Р.А., Оганесян А.В., Погосян К.П., Милютин Е.Р. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу. — М.: Радио и связь, 1985. — 208 с.
54. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967. — 548 с.
55. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1976. — 277 с.
56. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). — М.: Сов. радио, 1977. — 368 с.
57. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. — Новосибирск: Наука, 1981. — 248 с.
58. Распространение оптических волн в случайно-неоднородной атмосфере: Сб. статей под ред. Зуева В.Е. — Новосибирск: Наука, 1979. — 125 с.
59. Лазерный контроль атмосферы. / Под ред. Хинкли Э.Д. — М.: Мир, 1979. — 416 с.
60. Беленький М.С., Бороноев В.В., Гомбоев Н.Ц., Миронов В.Л. Оптическое зондирование атмосферной турбулентности. — Новосибирск: Наука, 1986. — 92 с.
61. Известия вузов. Физика. — 1985. Т. 28. № 11. Атмосферная адаптивная оптика. Тематический выпуск. — 124 с.
62. Банах В.А., Смалихо И.Н. Распространение лазерных пучков на вертикальных и наклонных протяженных трассах через турбулентную атмосферу. // Оптика атмосферы и океана. Т. 6. — 1993, № 4. С. 377–384.
63. Исимару А. Распространение и рассеяние поля в случайно-неоднородных средах. — М.: Мир, 1981, Т.1.— 280 с., Т.2.—320 с.
64. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. — М.: Мир, 1970. — 364 с.
65. Гудмен Дж. Статистическая оптика. — М.: Мир, 1988. — 528с.
66. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. — М.: Наука, 1966. — 404 с.
67. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973. — 957 с.
68. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
69. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
70. Даджигон Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. 488 с.
71. Применение методов Фурье-оптики. / Под ред. Старка Г. Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1988. — 536 с.



72. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с.
73. Прэйтт У. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. — М.: Мир, 1982, кн. 1. — 310 с., кн. 2. — 480 с.
74. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
75. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. — М.: Наука, 1981. — 640 с.
76. Тарасов Л.В. Введение в квантовую оптику. — М.: Высшая школа, 1987. — 304 с.
77. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. — М.: Наука, 1983. — 320 с.
78. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. — М.: Наука, 1986. — 296 с.
79. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 856 с.
80. Матвеев А.Н. Оптика. — М.: Высшая школа, 1985. — 351 с.
81. Прикладная оптика. / Под ред. Заказнова Н.П. — М.: Машиностроение, 1988. — 320 с.
82. Оптический производственный контроль. / Под ред. Малакары Д. — М.: Машиностроение, 1985. — 400 с.
83. Русинов М.М. Композиция оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1989. — 383 с.
84. Витриченко Э.А. Методы исследования астрономической оптики. — М.: Наука, 1980. — 151 с.
85. Витриченко Э.А., Прохоров А.М., Трушин Е.В. Методы изготовления астрономической оптики. — М.: Наука, 1980. — 194 с.
86. Витриченко Э.А., Лукин В.П. и др. Проблемы оптического контроля. — Новосибирск: Наука, 1990.
87. Справочник технолога-оптика. / Под ред. Окатова М.А. — СПб.: Политехника, 2004. — 679 с.
88. Компьютеры в оптических исследованиях. / Под ред. Б. Фридена. — М.: Мир, 1983. — 488 с.
89. Проектирование оптических систем. / Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта: Пер. с англ./ Под ред. И.В. Пейсахсона. — М.: Мир, 1983. — 432 с.
90. Звелто О. Принципы лазеров. — М.: Мир, 1984. — 400 с.
91. Справочник по лазерам. / Под ред. Прохорова А.М. — М.: Советское радио, 1978. Том 1. — 504 с. Том 2. — 400 с.
92. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы. — М.: Радио и связь, 1982. — 450 с.

93. Справочник по лазерной технике. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 544 с.
94. Рэди Дж. Промышленные применения лазеров. — М.: Мир, 1981. — 424 с.
95. Абельсиитов Г.А., Велихов Е.П., Голубев В.С. и др. Мощные газоразрядные  $\text{CO}_2$ -лазеры и их применение в технологии. — М.: Наука, 1984. — 106 с.
96. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблемы расходимости лазерного излучения. — М.: Наука, 1978. — 328 с.
97. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. — М.: Наука, 1990. — 264 с.
98. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 320 с.
99. Баранов Г.А., Астахов А.В., Зинченко А.К. Мощные технологические  $\text{CO}_2$ -лазерные комплексы на основе поперечного самостоятельного разряда. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 236 с.
100. Алейников В.С., Масычев В.И. Лазеры на окиси углерода. — М.: Радио и связь, 1990. — 312 с.
101. Цеснек Л.С., Сорокин О.В., Золотухин А.А. Металлические зеркала. — М.: Машиностроение, 1983. — 231 с.
102. Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал. — М.: Изд-во МИФИ, 1993. — 152 с.
103. Шмаков В.А. Силовая оптика. — М.: Наука, 2004. — 318 с.
104. Власов Н.М., Колесов В.С., Федик И.И. Стабильность оптической поверхности лазерных зеркал. — М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005. — 216 с.
105. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. 2-е издание. — М.: Техносфера, 2008. — 400 с.
106. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптикоэлектронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1986. — 175 с.
107. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с.
108. Богомоллов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК-систем. — М.: Радио и связь, 1987. — 208 с.
109. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с.
110. Тришенков М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992. — 400 с.
111. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2007. — 384 с.

112. [www.andor.com](http://www.andor.com).
113. <http://www.pco-scmos.com>.
114. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com).
115. Кибакин В.М. Основы ключевых методов усиления. — М.: Энергия, 1980. — 232 с.
116. Алексеев А.Г., Войшивилло Г.В., Трискахо И.А. Усилительные устройства. — М.: Радио и связь, 1986. — 160 с.
117. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1970. — 544 с.
118. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. — М.: Наука, 1976. — 576 с.
119. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1976. — 440 с.
120. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. — 576 с.
121. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. — М.: Машиностроение, 1985. — 472 с.
122. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Часть 1. Малые деформации. — М.: Наука, 1984. — 432 с.
123. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Часть 2. Конечные деформации. — М.: Наука, 1984. — 600 с.
124. Экспериментальная механика. / Под ред. Кобаяси А. Книга 1. — М.: Мир, 1990. — 616 с.
125. Экспериментальная механика. / Под ред. Кобаяси А. Книга 2. — М.: Мир, 1990. — 552 с.
126. Светлицкий В.А. Механика стержней. — М.: Высшая школа, 1987. Кн. 1. — 320 с. Кн. 2. — 304 с.
127. Фролов К.В. Вибрация — друг или враг? — М.: Наука, 1984. — 144 с.
128. Degnan J.J. «Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review». Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. Geodynamics Series, V. 25, p. 133–161.
129. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. — М.: Наука, 1990. — 432 с.
130. Хаус Х. Волны и поля в оптоэлектронике. — М.: Мир, 1988. — 432 с.
131. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. — М.: Наука, 1984. — 432 с.
132. Кайно Г. Акустические волны. — М.: Мир, 1990. — 656 с.
133. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 496 с.

134. Справочник по теории автоматического управления. / Под ред. А.А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — 712 с.
135. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. — М.: Наука, 1984. — 320 с.
136. Астапов Ю.М., Медведев В.С. Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1982. — 304 с.
137. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. — М.: Советское радио, 1980. — 232 с.
138. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высшая школа, 1989. — 263 с.
139. Устойчивость адаптивных систем. Пер. с англ. / Андерсон Б., Битмид Р., Джонсон К. и др. — М.: Мир, 1989. — 263 с.
140. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высшая школа, 1980. — 287 с.
141. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1989. — 304 с.
142. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. — М.: Машиностроение, 1973. — 606 с.
143. Неймарк Ю.И., Коган Н.Я., Савельев В.П. Динамические модели теории управления. — М.: Наука, 1985. — 400 с.
144. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В. и др. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1983. — 392 с.
145. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. — М.: Наука, 1986. — 328 с.
146. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. — М.: Мир, 1980. — 610 с.
147. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. — М.: Мир, 1981. — 520 с.
148. Справочник по специальным функциям. / Под ред. Абрамовица М. и Стиган И. — М.: Наука, 1979. — 822 с.
149. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1968. — 344 с.
150. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1970. — 720 с.
151. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1986. — 544 с.
152. Рао С.Р. Линейные статистические методы и их применения. — М.: Наука, 1968.

153. Карлсрой Г., Эгер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
154. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
155. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М.: Наука, 1975. — 227 с.
156. Боли Б., Уэйнер Д. Теория температурных напряжений. — М.: Мир, 1964. — 517 с.
157. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. — Киев: Наукова думка, 1970. — 307 с.
158. Глозман И.А. Пьезокерамика. — М.: Энергия, 1972. — 288 с.
159. Яффе Б. и др. Пьезоэлектрическая керамика. — М.: Мир, 1974. — 288 с.
160. Физические величины: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
161. Adaptive Optics for Vision Science: Principles, Practices, Design, and Applications. Ed. by Porter J., Queener H., Lin J. et al. John Wiley and Sons, 2006. 600 p.
162. Larichev A.V., Ivanov P.V., Iroshnikov N.G. et al. «Adaptive system for eye-fundus imaging». Quantum Electronics, 2002, V. 32, № 10, p. 902–908.
163. Труды 17-го Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» на диске. — Томск: Институт оптики атмосферы, 2011.
164. Оптические информационные технологии. // Тематический выпуск журнала. Автометрия. Т. 48. — 2012, № 2.
165. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. — М.: Техносфера, 2012. — 200 с.

# ЧАСТЬ I

## АДАПТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ

### ГЛАВА I

#### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

##### 1.1. Источники фазовых искажений при распространении света

В ряде работ при анализе фазовых искажений прошедшего через турбулентную атмосферу света показано, что наибольший вклад в фазовые искажения вносят наклоны волнового фронта. На рис. 1.1 [1] показано, к чему приводят наклоны волнового фронта. В каждый следующий момент времени фокусировка излучения осуществляется в новое место фокальной плоскости. При длительной экспозиции фокальное пятно расплывается, как показано на рисунке.

Особенно критичными угловые ошибки становятся в случаях необходимости точного (прецизионного) позиционирования фокального пятна (например при наведении на щель спектрофотометра при астрономических наблюдениях, на стык свариваемых деталей, в определенную область глазного дна в офтальмологии и т. д.) и при приеме/передаче излучения на большие расстояния в астрономических, телекоммуникационных и лазерных системах. В частности, одной из задач, выполняемых адаптивной оптикой на крупном космическом телескопе, является обеспечение режима сверхточного наведения на

заданную точку пространства. При дрейфе ориентации оси телескопа в пределах  $\sim 30''$  необходимо обеспечивать удержание фокального пятна на научных приборах с точностью  $\sim 0,2''$  ( $\sim 1$  мкрад).

В передающих системах проявление наклонов волнового фронта называют блужданием или биением пучка (beam wander), а в приемных системах — дрожанием изображения (image jitter). По сути, и то и другое есть следствие одних и тех же причин. Обратим также внимание на то, что такие критерии качества, как число Штреля и нормированная яркость источника излучения, полученные для длительной экспозиции, одинаковым образом зависят от фазовых искажений — угловой ошибки  $\alpha_H$  и среднеквадратичной фазовой ошибки на апертуре  $\sigma$ :

$$\langle B_r \rangle = \frac{B_r}{\left[ \frac{\pi \cdot D^2 \cdot P_{\text{вых.}}}{4 \cdot \lambda^2} \right]} = \frac{\exp(-\sigma^2)}{1 + \left( \frac{2,22 \cdot \alpha_H \cdot D}{\lambda} \right)^2} \quad \text{и} \quad \bar{I} = \frac{\exp(-\sigma^2)}{1 + \left( \frac{2,22 \cdot \alpha_H \cdot D}{\lambda} \right)^2},$$

где  $D$  — диаметр передающей/приемной апертуры, м;  $P_{\text{вых.}}$  — мощность на выходе лазерной установки, Вт;  $\lambda$  — длина волны излучения, м;  $\sigma = 2\pi\Delta\Phi/\lambda$ ,  $\Delta\Phi$  — СКО искажений волнового фронта (или остаточная ошибка коррекции), м.

Это означает, что фазовые искажения волнового фронта одинаково влияют и на приемные, и на передающие системы.

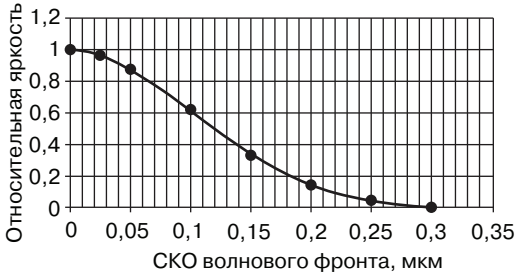
Проанализируем поведение зависимости  $\langle Br \rangle$  или  $\bar{I}$  от  $\Delta\Phi$  и  $\alpha_H$ , вначале полагая, что  $\alpha_H = 0$ , а затем, что  $\Delta\Phi = 0$ .

Зависимость яркости от СКО фазовых искажений подобна зависимости числа Штреля от СКО остаточной ошибки коррекции. График этой зависимости приведен на рис. 1.2. Видно, что при СКО = 0,16 мкм относительная яркость падает до 0,3, а при СКО = 0,24 мкм — до 0,07.

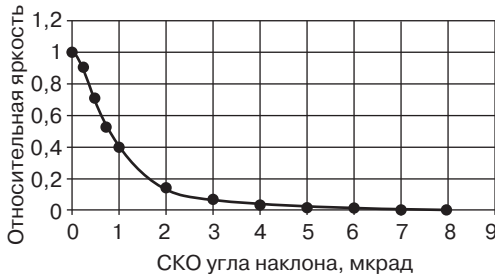
Зависимость яркости от СКО угла наклона приведена на рис. 1.3. Также видна сильная зависимость относительной яркости от СКО угла наклона. Так, при СКО = 2 мкрад (что примерно соответствует максимальному



**Рис. 1.1.** При короткой экспозиции в результате наклона волнового фронта смещается точка фокусировки излучения в фокальной плоскости. При длительной экспозиции профиль интенсивности расплывается



**Рис. 1.2.** Зависимость относительной яркости от СКО (RMS) волнового фронта (за исключением наклонов)



**Рис. 1.3.** Зависимость яркости от СКО угла наклона

углу наклона 5,4 мкрад, или 1,1" относительная яркость составляет 0,141.

Таким образом, яркость источника излучения или качество изображения в приемной системе сильно зависят как от остаточной ошибки коррекции наклонов волнового фронта, так и от остаточной ошибки коррекции фазовых искажений более высокого порядка, в результате чего возникает задача разумной балансировки этих ошибок. Отметим также, что зависимость яркости от угла в области малых углов ( $\leq 1$  мкрад) более крутая, нежели чем от искажений волнового фронта.

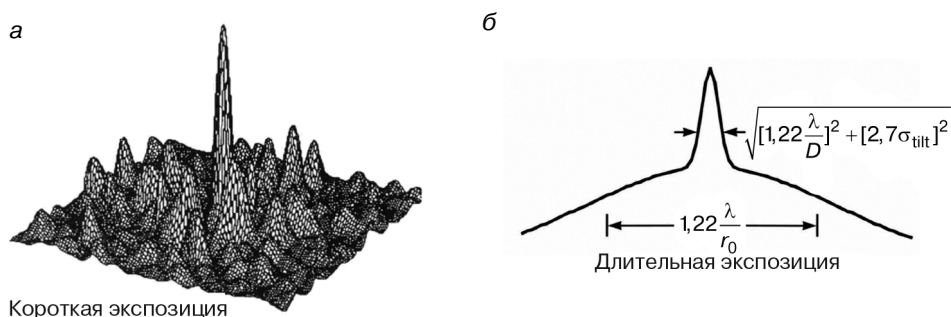
Описанию и анализу источников фазовых аберраций в оптических системах посвящена обширная литература, небольшая доля которой приведена в библиографии к введению. Источниками аберраций являются атмосферная турбулентность и воздействие лазерного пучка на среду распространения — самовоздействие или тепловое расплывание (в случае мощного излучения) при распространении излучения в атмосфере, разъюстировки и вибрации оптических элементов, термические деформации оптических элементов и интегрирующих конструкций, ошибки изготовления оптики, аберрации источников излучения, динамические пограничные слои в районе выходных апертур, угловые ошибки систем наведения и сопровождения, анизопланатизм. Применительно к каждой системе с учетом ее специфики и источников аберраций волнового фронта составляют так называемый бюджет ошибок [15, 20, 26, 34]. На основании выбранного критерия качества оптической системы и сформированного бюджета ошибок проводят проектирование адаптивной системы.

Приведем краткое описание вышеперечисленных источников аберраций.

Общие сведения о результатах исследований адаптивных систем в условиях *турбулентной атмосферы* приведены ниже. Отметим, что несмотря на большие достижения в этой области задача компенсации атмосферных фазовых искажений еще до конца не решена.



На рис. 1.4, *a* приведено изображение точечного источника света, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, при короткой экспозиции съемки [52]. Центральный и окружающие его пики являются дифракционно-ограниченными. При длительной экспозиции пятно расплывается, а профиль его интенсивности принимает характерный вид и размеры, показанные на рис. 1.4, *б*.



**Рис. 1.4.** Изображение точечного источника света, наблюдаемого через турбулентную атмосферу, при короткой экспозиции (*a*) и профиль его интенсивности при длительной экспозиции (*б*)

Практически во всех книгах, посвященных атмосферной адаптивной оптике, приводятся зависимости для оценки амплитуды и частоты для коррекции наклонов волнового фронта, прошедшего через атмосферу светового пучка. Наиболее часто в последнее время употребляются зависимости, использующие длину или радиус когерентности, который часто называют радиусом Фрида,  $r_0$ , и который может быть вычислен по формуле

$$r_0 = 1,68 \cdot (C_n^2 \cdot k^2 \cdot L)^{-\frac{3}{5}}, \quad (1.1a)$$

где  $C_n^2$  — структурная постоянная флуктуаций показателя преломления,  $\text{м}^{-2/3}$ ;  $L$  — длина трассы, м;  $k$  — волновое число, которое рассчитывается по формуле  $k = 2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны, м.

Для вертикальной и наклонной трасс при распространении волн с Земли через толщу атмосферы в космос радиус когерентности составит

$$r_0 = 3,85 \cdot 10^6 \cdot (\lambda^2 \cdot \cos Q)^{\frac{3}{5}}, \quad (1.16)$$

где  $Q$  — зенитный угол.

На рис. 1.5 приведены зависимости радиуса Фрида от длины волны и значения зенитного угла. Видно, что для диапазона длин волн от 0,5 до 1 мкм радиус когерентности может изменяться в широких пределах. Так, для длины

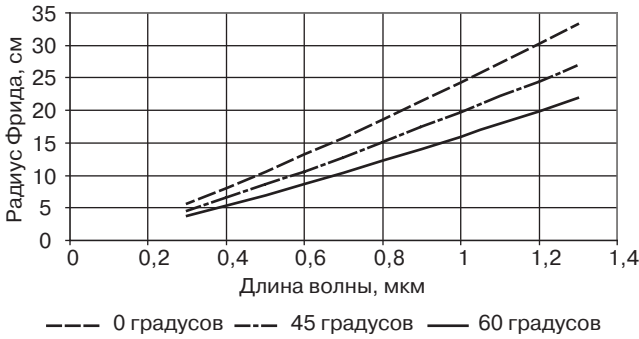


Рис. 1.5. Зависимости радиуса Фрида от длины волны и значения зенитного угла

волны 0,7 мкм (средняя длина волны при наблюдении кремниевой матрицей) радиус когерентности изменяется в диапазоне ~10–16 см для ночных условий и, соответственно, ~5–10 см для дневных условий.

Максимальный наклон волнового фронта может быть вычислен по формуле

$$M_H = \pm 2,5\sigma_H, \tag{1.2}$$

где дисперсия наклона по одной оси вычисляется по формуле [15]:

$$\sigma_{H1}^2 = 0,182 \left( \frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \left( \frac{\lambda}{D} \right)^2. \tag{1.3}$$

Здесь  $D$  — диаметр передающей или приемной апертуры,  $\lambda$  — длина волны. Для  $D=0,5$  м,  $\lambda=0,7 \cdot 10^{-6}$  м и зенитного угла 60 градусов  $r_0=0,1$  м, а среднеквадратичное отклонение приходящего изображения составит  $\sigma_{H1} = 2,28 \cdot 10^{-6}$  рад и, соответственно, максимальный наклон —  $M_{H1} = \pm 5,7 \cdot 10^{-6}$  рад =  $\pm 1,18$  угловых секунды. Множитель 2,5 в формуле (1.2) означает, что в случае гауссовского распределения наклонов с вероятностью 99,4 % стандартное отклонение составит  $\pm 2,5$ .

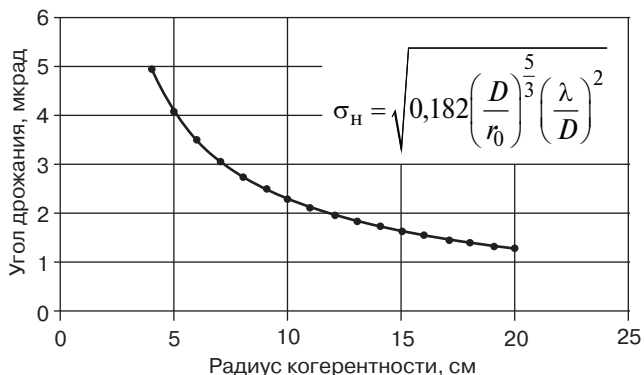
На рис. 1.6 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения угла дрожания изображения по одной оси от радиуса когерентности, рассчитанная для диаметра приемной апертуры 0,5 м и длины волны  $0,7 \cdot 10^{-6}$  м.

Если в системе используется телескоп, то перемещение находящегося за телескопом корректора наклонов для компенсации вычисленной аберрации можно определить по формуле

$$\alpha_H = \frac{1}{2} M_H \left( \frac{D_{\text{тел.}}}{D_{\text{н.з.}}} \right), \tag{1.4}$$

что для  $D_{\text{тел.}} = 0,5$  м,  $D_{\text{н.з.}} = 0,1$  м и  $M_{H1} = \pm 5,7 \cdot 10^{-6}$  рад даст  $\alpha_{H1} = \pm 28,5 \cdot 10^{-6}$  рад =  $\pm 5,9$  угловых секунды.

**Рис. 1.6.** Зависимость среднеквадратичного отклонения угла дрожания изображения по одной оси от радиуса когерентности атмосферы



Заметим, что полученные Фридом соотношения для дисперсии фазовых искажений базировались на модели атмосферной турбулентности Колмогорова—Обухова, в которой внешний масштаб считается бесконечным. Если использовать спектры атмосферной турбулентности с конечным внешним масштабом  $L_0$ , то дисперсия дрожания изображения описывается формулой [8]  $\sigma^2 \approx \int_0^\infty dh C_n^2(h) [D_{\text{тел}}^{-1/3} - (1/D_{\text{тел}}^2 + \chi_0^2)^{1/6}]$ , где  $D_{\text{тел}}$  — диаметр апертуры телескопа,  $\chi_0 = 2\pi/L$  — волновое число, определенное по внешнему масштабу турбулентности. Видно, что внешний масштаб начинает оказывать влияние на дрожание изображения, уже когда апертура телескопа составляет лишь  $\sim 1\%$  от величины внешнего масштаба турбулентности,  $D_{\text{тел}} \sim 0,01 L_0$ . Напомним, что по данным различных измерений [27] внешний масштаб турбулентности для вертикальных трасс в астроклиматических условиях различных обсерваторий составляет 1,5–300 м. С практической точки зрения учет при коррекции наклонов волнового фронта ограничения спектра атмосферной турбулентности с конечным внешним масштабом  $L_0$  приведет лишь к погрешностям оценки дисперсии наклонов. Так, при  $D_{\text{тел}} = 1$  м и масштабе  $L_0 = 6,3$  м, разница в оценках составит  $\sim 12\%$  в сторону уменьшения. При увеличении диаметра телескопа разница увеличивается, но при реальном проектировании лучше иметь оценку сверху. Поэтому целесообразно для оценок использовать зависимости, базирующиеся на радиусе когерентности.

Частота среза адаптивной системы может быть оценена по формуле

$$f_c = \left[ \frac{0,515 \cdot D_s^2}{\ln I^{-1}} \right]^{\frac{3}{5}} \cdot \frac{v}{D}, \quad (1.5)$$

где  $v$  — скорость поперечного ветра, м/с;  $D$  — диаметр пучка, м. Для  $D = 500$  мм, ветра с поперечной составляющей скорости 10 м/с и числа Штреля  $I = 0,8$  получим  $f_c = 55,1$  Гц.

В различных работах показано, что при распространении света в атмосфере вклад в величину среднеквадратичного отклонения (СКО, RMS) волнового фронта более высоких, чем наклоны, порядков составляет ~7–20% [2–5]. В качестве примера приведем результаты (рис. 1.7) классической работы [3], в которой искажения волнового фронта в соответствии с колмогоровской моделью турбулентности раскладывались по коэффициентам полиномов Цернике. На рис. 1.7 по оси абсцисс отложен номер полинома Цернике, а по оси ординат — вклад в СКО волнового фронта различных полиномов в единицах  $(D/r_0)^{5/6}$ .

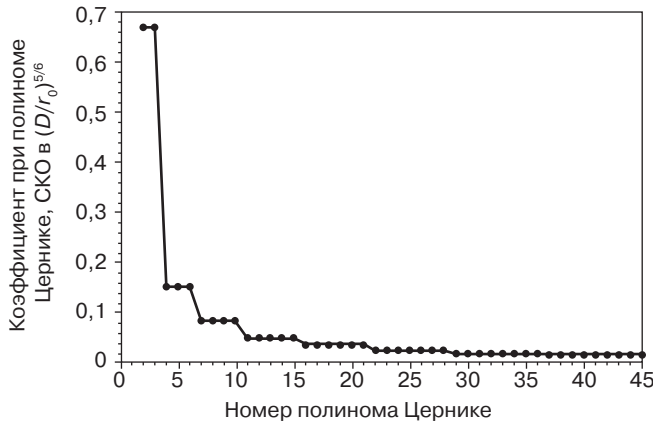


Рис. 1.7. Атмосферные коэффициенты Цернике

Видно, что наклоны по двум координатам вносят превалирующий вклад в фазовые искажения. Затем идут простейшие аберрации — фокус, астигматизм, кома, а аберрации более высоких порядков играют роль фоновых. Нескорректированный волновой фронт при распространении на турбулентной трассе имеет вариацию

$$\sigma^2 = 1,03 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}, \tag{1.6}$$

после коррекции одномерного наклона — вариацию

$$\sigma^2 = 0,582 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}, \tag{1.7}$$

после коррекции двумерного наклона — вариацию

$$\sigma^2 = 0,134 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}, \tag{1.8}$$

после коррекции двумерного наклона и фокуса — вариацию

$$\sigma^2 = 0,111 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}, \quad (1.9)$$

после коррекции мод высокого порядка — вариацию

$$\sigma^2 = 0,2944 \cdot N_m^{-0,866} \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}, \quad (1.10)$$

где  $N_m$  — число корректируемых мод.

Видно, что основной вклад в прирост расходимости делает блуждание пучка (дрожание изображения) или наклон. Вариация угла наклона  $\sigma_\alpha^2$  (по двум осям) определяется по формуле [15]

$$\sigma_\alpha^2 = 0,364 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \cdot \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2. \quad (1.11)$$

При  $r_0 = 5$  см,  $D = 0,5$  м и  $\lambda = 0,7 \cdot 10^{-6}$  м  $\sigma_\alpha^2 = 33 \cdot 10^{-12}$  рад<sup>2</sup>, или  $\sigma_\alpha = 5,74 \cdot 10^{-6}$  рад. Максимальные значения углов могут быть в 2,5 раза больше, или  $\alpha = \pm 1,44 \cdot 10^{-5}$  рад =  $\pm 3''$ .

Статическая остаточная ошибка коррекции наклонного зеркала аппаратурно может быть сведена к нулю, и определяющей станет остаточная динамическая ошибка коррекции. Для системы управления наклонами с частотой  $f_{3dB}$  (ширина полосы по уровню 3 дБ) вариация угла наклонов после компенсации составит

$$\sigma_\alpha^2 \text{ комп} = \left(\frac{f_{TG}}{f_{3dB}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2, \quad (1.12)$$

где частота Гринвуда  $f_{TG}$  для G-наклона определяется по формуле

$$f_{TG} = 0,331 \cdot D^{-\frac{1}{6}} \cdot \lambda^{-1} \cdot \sqrt{\sec\beta} \cdot \left[\int C_n^2(\xi) \cdot V_\perp^2 \cdot d\xi\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.13)$$

где  $\beta$  — угол наклона трассы.

Для Z-наклона константа в формуле (13) будет равна 0,368.

Для горизонтальной трассы, приподнятой на  $10^\circ$ , при постоянных  $C_n^2$  и это выражение примет вид

$$f_{TG} = 0,331 \cdot D^{-\frac{1}{6}} \cdot \lambda^{-1} \cdot \sqrt{\sec\beta} \cdot \left[C_n^2 \cdot V_\perp^2 \cdot L\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.14)$$