

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

Институт прикладной математики и информатики био- и нанотехнологий
Кафедра физики и прикладной математики

Лексин Андрей Юрьевич
Кутровская Стелла Владимировна

Методические указания для самостоятельной работы
по дисциплине
«Физические и математические принципы адаптивной оптики»

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлениям
200500.62 (12.03.05) «Лазерная техника и лазерные технологии»,
200500.68 (12.04.05) «Лазерная техника и лазерные технологии»

Владимир-2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
ТЕМА 1. Разновидности систем адаптивной оптики	4
ТЕМА 2. Области применения адаптивных оптических систем	5
ТЕМА 3. Датчики волнового фронта, работающие на интерферометрических принципах	6
ТЕМА 4. Датчики волнового фронта, использующие принцип Гартмана	7
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 1–4.....	8
ТЕМА 5. Математический аппарат для описания оптического изображения и формирующей его системы.....	18
ТЕМА 6. Оптическая передаточная функция	19
ТЕМА 7 Зеркала с синтезированной апертурой	20
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 5–7.....	21
ТЕМА 8. Способы оценки качества изображения, формируемого оптической системой	31
ТЕМА 9. Технологии создания узлов адаптивных оптических систем	32
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 8–9.....	33
Вопросы и задания для самоконтроля по теоретическому материалу	39
Список литературы:	42

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивная оптика является хотя и относительно молодой областью лазерной техники, но уже нашедшей множество применений в целом ряде прикладных задач. Мощные технологические лазерные системы, астрофизика, медицина, дистанционное зондирование объектов – это неполный перечень сфер применения адаптивной оптики. Внедрение адаптивных зеркал различных типов в данных областях является на сегодняшний день во многом конструкторско-технологической задачей. Тем не менее, потенциал адаптивной оптики до сих пор представляется не до конца раскрытым. Несмотря на кажущуюся простоту базовой идеи – динамическая коррекция волнового фронта оптического излучения – остаётся множество вопросов по созданию высокоэффективных адаптивных оптических систем (АОС). Сюда входят как проблемы технологии изготовления зеркал, так и задачи совершенствования программного обеспечения и электронных блоков управления. И без понимания физических и математических принципов, лежащих в основе АОС, продвижение в решении этих задач вряд ли возможно.

Изучение дисциплины «Физические и математические принципы адаптивной оптики» предполагает значительный объём (более 50% от общей трудоёмкости дисциплины) самостоятельной работы студента, направленный на самостоятельное формирование соответствующих знаний, умений, навыков и компетенций. Поэтому требуется особенно внимательно отнестись к планированию СРС и её управлению.

Настоящие методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины содержат рекомендации и дополнительный материал, позволяющий студенту организовать процесс изучения физических и математических принципов работы АОС.

Основными видами самостоятельной работы студентов без участия

преподавателей (внеаудиторная СРС) при освоении данного курса являются:

формирование и изучение содержания конспекта лекций на базе рекомендованной лектором учебной литературы, включая информационные образовательные ресурсы;

подготовка к лабораторным работам, их оформление;

выполнение домашних заданий к практическим занятиям в виде решения отдельных задач;

текущий самоконтроль и контроль успеваемости.

Методические рекомендации по изучению теоретического материала дисциплины «Физические и математические принципы адаптивной оптики» даны по основным темам курса, дополняя лекционный материал и затрагивая вопросы, не рассмотренные в лекциях.

ТЕМА 1. Разновидности систем адаптивной оптики

Основные вопросы темы: история возникновения адаптивной оптики от первоначальной идеи в астрофизике в 1950-х годах до технической реализации в 1980-х. Принципиальная схема АОС. Компоненты АОС: корректор волнового фронта (ВФ), датчик ВФ, электронная система управления, компьютер, программное обеспечение для обратной связи. Фазово-сопряжённые АОС. Адаптивные оптические системы, основанные на повышении резкости изображения. Варианты базовых схем АОС.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с основной идеей адаптивной оптики – динамическим изменением формы поверхности оптического зеркала для компенсации искажений волнового фронта оптического излучения, – а также с типовыми схемами АОС и направлениями модификации этих схем.

Основной понятийно-терминологический аппарат: волновой фронт, турбулентность атмосферы, оптическая aberrация, обратная связь, оптическое зеркало, фазовое сопряжение, резкость изображения, светоделитель.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, ориентироваться в базовых понятиях, описывающих свойства оптического излучения, понимать принципы сопряжения систем различной природы (оптических, электронных), иметь понятие об алгоритмизации и программировании.

ТЕМА 2. Области применения адаптивных оптических систем

Основные вопросы темы: возможности АОС: коррекция волнового фронта, улучшение качества оптического изображения при прохождении излучения через различные среды, стабилизация и оптимизация различных параметров лазерного излучения, формирование и поддержание заданного распределения интенсивности лазерного пучка на заданной поверхности, улучшение качества фокусировки лазерного пучка, изменение формы пучка. Области применения АОС: оптическая астрономия (адаптивные оптические телескопы, оптические интерферометры), передача световой энергии на далёкие расстояния, адаптивные резонаторы лазеров, лазерная левитация, коррекция аберраций зрения.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с двумя вопросами: принципиальными возможностями АОС и адаптацией этих возможностей в различных прикладных задачах. Понимание логики перехода от теории адаптивной оптики к её приложению является необходимым условием для развития собственных идей внедрения АОС в научных и промышленных приложениях.

Основной понятийно-терминологический аппарат: волновой фронт, перетяжка лазерного пучка, распределение интенсивности излучения, телескоп, интерферометр, лидар, лазерная левитация, глаз как оптическая система.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, представлять физические механизмы возникновения аберраций волнового фронта, понимать механизм фокусировки монохроматического излучения.

ТЕМА 3. Датчики волнового фронта, работающие на интерферометрических принципах

Основные вопросы темы: математическое описание деформации формы волнового фронта, интерференция светового поля на объектах различной природы, интерферометр Майкельсона для наблюдения интерференционных полос равного наклона, интерферометр Тваймана-Грина интерферометр Физо на тонких плёнках как инструмент контроля качества оптических поверхностей, интерферометры сдвига с различными разделительными элементами, определение формы волнового фронта по интерферограмме.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с различными типами интерферометров, используемых для определения формы волнового фронта, с областями применения данной техники, а также с математическими соотношениями, используемыми в интерферометрическом способе измерения ВФ.

Основной понятийно-терминологический аппарат: интерференция, интерференционная картина, интерферометр, волновой фронт, спектр оптического излучения.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен понимать волновую природу света, явления интерференции и дифракции, быть знаком с принципами геометрической оптики, с основными её соотношениями, должен владеть интегральным и дифференциальным счислением, знать основные типы оптических элементов, используемых в устройствах оптотехники.

ТЕМА 4. Датчики волнового фронта, использующие принцип Гартмана

Основные вопросы темы: диафрагма Гартмана, метод Гартмана и его математическое описание. Проблема расположения объектива в методе Гартмана. Выбор размера отверстий диафрагмы Гартмана. Аппроксимация волнового фронта аппроксимационной функцией. Полиномы Цернике и их связь с абберациями волнового фронта. Технические проблемы применения метода Гартмана. Метод Шака-Гартмана для определения искажений волнового фронта и квадрантные фотоприёмники. Варианты исполнения оптической части датчиков гартмановского типа. Преимущества использования метода Шака-Гартмана: быстрота алгоритмов, устойчивость к вибрациям, независимость от интенсивности света.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с идеями метода Гартмана, с проблемами его использования в оригинальной форме, с более совершенной его модификацией – методом Шака-Гартмана, получившим наибольшее распространение при создании АОС.

Основной понятийно-терминологический аппарат: полиномы Цернике, плоский волновой фронт, лenzлет, квадрантный фотоприёмник, ряд Тейлора, датчик Шака-Гартмана, гартманограмма.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, иметь общее представление о полиномах Цернике, о методах аппроксимации функций, знать способы преобразования координат между координатными пространствами различных типов.

Дополнительные сведения о структуре и классификации адаптивных оптических систем.

Адаптивные оптические системы коррекции волнового фронта светового излучения (далее – адаптивные системы) условно можно разделить на два больших класса: это системы передачи энергии (в этом случае адаптивный корректор вносит предискажение в волновой фронт пучка света, которое затем компенсируется искажениями на трассе до цели), и системы коррекции изображения (в этом случае адаптивный корректор располагается перед приёмником, то есть происходит коррекция волнового фронта уже непосредственно перед получением изображения цели).

В свою очередь, и те и другие системы могут быть реализованы на двух основных принципах (см. рис. 1): принципе фазового сопряжения и принципе апертурного зондирования.

Адаптивная оптическая система состоит из корректора (адаптивного зеркала), датчика волнового фронта, блока управления, компьютера и программного обеспечения. Цель работы системы — получение на выходе из системы волнового фронта, соответствующего требуемому распределению фаз, которое, как правило, является плоским. Часть входящего в систему излучения с помощью светоделительной пластины ответвляется на датчик волнового фронта, данные с которого поступают в компьютер. В программе анализируется волновой фронт и вычисляются управляющие напряжения, которые необходимо подать на электроды корректора. Подача напряжений осуществляется автоматически с помощью блока управления. Рассмотрим основные составные части замкнутой адаптивной оптической системы.

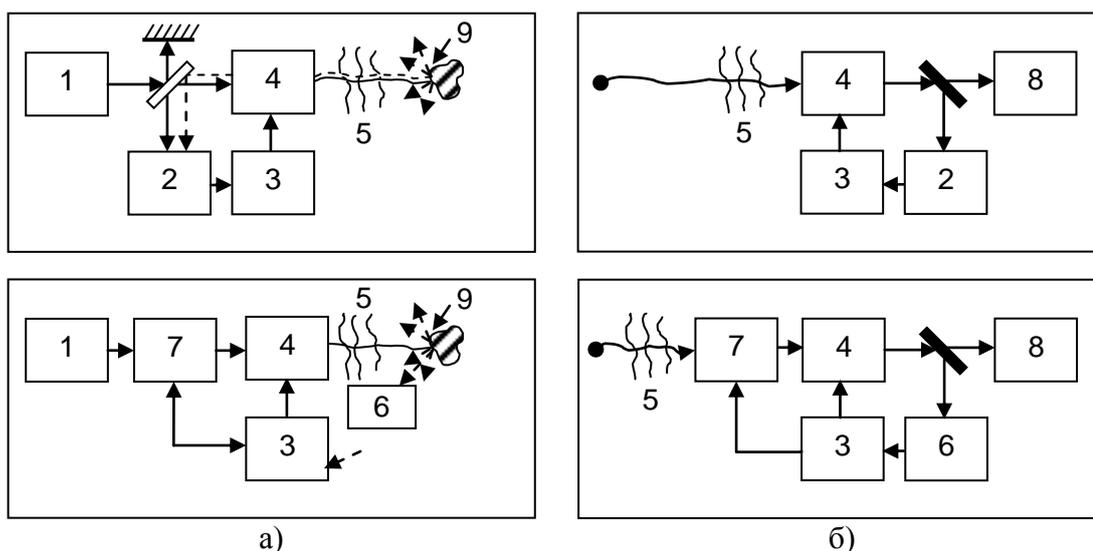


Рис. 1. Адаптивные оптические системы

a, б – с выходящей и принимаемой волной соответственно, реализующие принцип фазового сопряжения (верхний рисунок) и апертурного зондирования (нижний рисунок); 1 – источник света; 2 – датчик волнового фронта; 3 – устройство обработки данных; 4 – устройство воздействия на волновой фронт; 5 – возмущения волнового фронта; 6 – приёмник интенсивности; 7 – система апертурного зондирования; 8 – приёмник изображения; 9 – цель [2, с.15]

Корректор волнового фронта является ключевым элементом любой адаптивной оптической системы и определяет структуру и возможности всей системы. К корректору предъявляются повышенные требования: эффективность воспроизведения aberrаций волнового фронта, широкий диапазон деформации поверхности при небольшом количестве управляющих электродов, температурная стабильность поверхности, лучевая стойкость покрытия, простота изготовления, а также низкая стоимость [1, с. 679].

Корректоры дифференцируют по следующим критериям.

По типу приводов:

- электромеханический;
- электромагнитный;
- гидравлический;
- пьезоэлектрический.

По типу конструкций:

- секционированные;
- сплошные деформируемые.

В свою очередь, пьезоэлектрические зеркала, как наиболее распространённые, делятся на:

- выполненные в виде пьезоблоков;
- с биморфными пьезоэлементами;
- с трубчатыми пьезоэлементами;
- с пьезопакетами [2, с.34-35].

Корректор на основе биморфного пьезоэлемента, или так называемое биморфное зеркало, наиболее полно удовлетворяет перечисленным выше требованиям. Биморфное зеркало состоит из подложки с отражающим покрытием и приклеенных к ней двух пьезокерамических дисков (рис. 2).

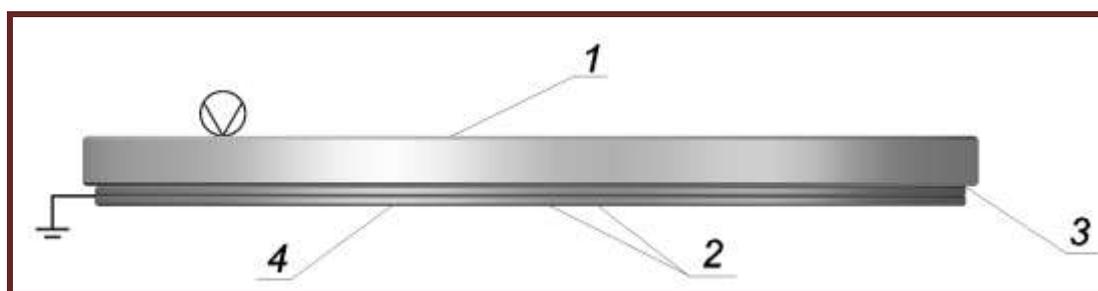


Рис. 2. Устройство биморфного зеркала

1 – подложка с отражающей поверхностью; 2 – пьезокерамические диски; 3 – электрод для управления кривизной; 4 – электроды для коррекции aberrаций низших порядков

Внутренний пьезодиск со сплошным электродом служит для коррекции общей кривизны поверхности (например, дефокусировка). На поверхности второго диска выполнены электроды в виде секторов, которые служат для воспроизведения aberrаций низших порядков, таких, как астигматизм, кома, сферическая aberrация. На рис. 3 показаны возможные схемы расположения электродов.

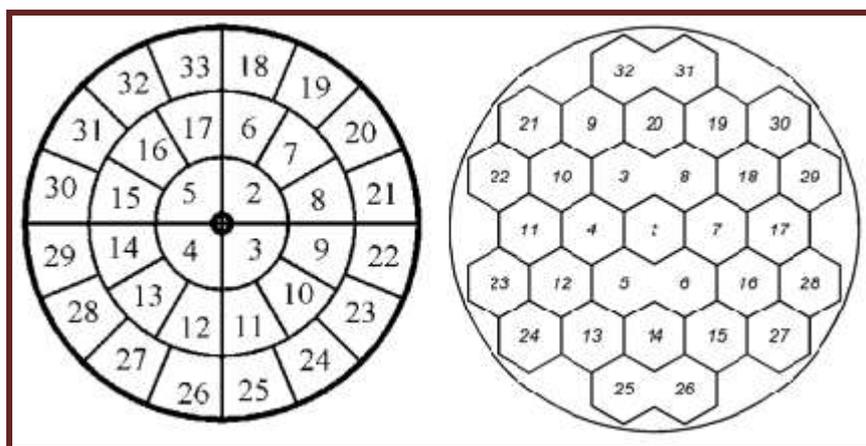


Рис. 3. Схемы расположения управляющих электродов

Количество необходимых электродов и их размер определяются внешними условиями, например характерным видом искажения волнового фронта и пространственным масштабом искажений, которые необходимо скомпенсировать. Деформация (изгиб) зеркала происходит вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта при наличии электрического поля E в пьезодиске. Пьезоэффект приводит к продольному растяжению (сжатию) пьезокерамики. Это растяжение влечёт за собой изгиб отражающей поверхности. Такой тип корректора является оптимальным для компенсации крупномасштабных искажений размером более 3—5 мм. В [3] показано, что, во-первых, среднеквадратичное отклонение (СКО, RMS) воспроизводимых корректором aberrаций от теоретических значений оказалось минимальным, когда первое и второе кольца электродов имели радиусы $r_1 = 0.5R$ и $r_2 = 0.9R$ соответственно, где R — радиус биморфного зеркала. Во-вторых, в этом случае СКО составило 0.3 % для дефокусировки, 0.7 % для астигматизма, 5 % для комы и 6 % для сферической aberrации.

Измерение волнового фронта в процессе работы адаптивной системы осуществляется датчиком волнового фронта. Выбор в большинстве адаптивных оптических систем в качестве ДВФ датчика волнового фронта Шака-Гартмана обусловлен следующими характеристиками. Он менее

чувствителен к механическим вибрациям, способен работать с импульсным излучением фемтосекундного диапазона длительности [1].

Главные элементы датчика — приемник ПЗС-камеры и линзовый растр. Пучок света падает на двумерную решетку из одинаковых линз (линзовый растр). Каждая линза занимает малую часть апертуры, называемую субапертурой, и строит изображение источника. Все изображения строятся на одном детекторе, обычно на ПЗС (CCD). Для согласования апертуры измеряемого пучка и приемника обычно применяется телескоп.

Когда входящий волновой фронт плоский, все сфокусированные изображения расположены в правильном порядке, определяемом геометрией линзового растра. Когда волновой фронт искажается, изображения смещаются от своих "нулевых" положений. Смещение центроида изображения в двух перпендикулярных направлениях x, y пропорциональны средним наклонам волнового фронта $\{\alpha_x, \alpha_y\}$ в субапертурах. То есть по сути, ДВФ Шака-Гартмана измеряет наклоны волнового фронта [10]. Схема датчика Шака-Гартмана показана на рис. 4.

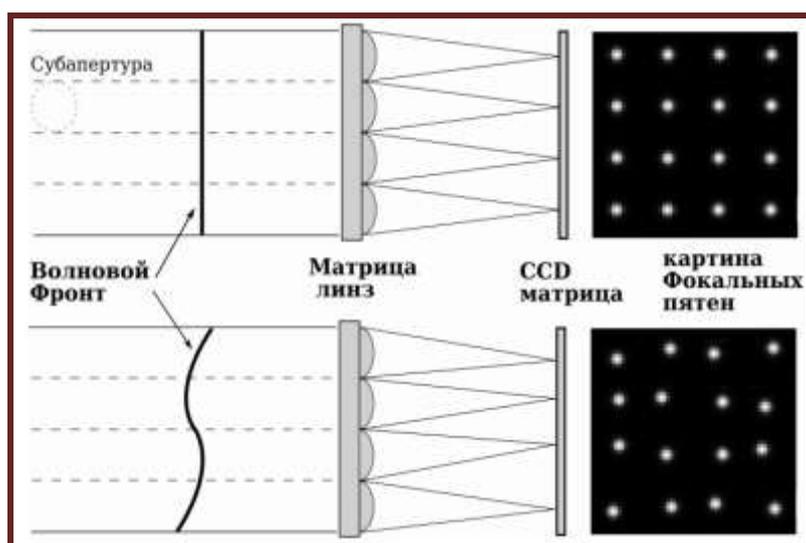


Рис. 4. Схема датчика Шака-Гартмана

Дополнительные сведения о сферах применения адаптивных оптических систем.

Рассмотрим некоторые примеры применения адаптивных оптических систем в практических приложениях в дополнение к материалу лекционного курса.

Промышленность.

В промышленных установках лазерной резки и сварки, в системах обработки материалов расстояние от источника лазерного излучения до объекта может составлять 10 и более метров. Нагрев среды и оптических элементов, потоки воздуха в канале распространения и другие факторы приводят к увеличению радиуса фокального пятна на 45 и более процентов, смещению пятна до 0,5 мм, т.е. в итоге – к уменьшению качества выполняемой операции.

Введение адаптивной коррекции в данных условиях позволяет практически полностью компенсировать искажения излучения [5].

Микроскопы, включающие адаптивные системы.

Адаптивная коррекция искажений выполняется также в конфокальных сканирующих микроскопах, которые работают по следующему принципу: сфокусированный лазерный пучок падает на образец, отражается от образца в схеме, работающей на отражение, или проходит через образец в схеме, работающей на просвет. Затем пучок попадает на точечную апертуру и, пройдя через нее, на фотоприемник. Так формируется изображение одной точки. Полное изображение получается при смещении образца.

Эффективность коррекции по наклонам иллюстрируется на рис. 5. Можно видеть, что в этом случае также достигается значительное повышение контраста [5].

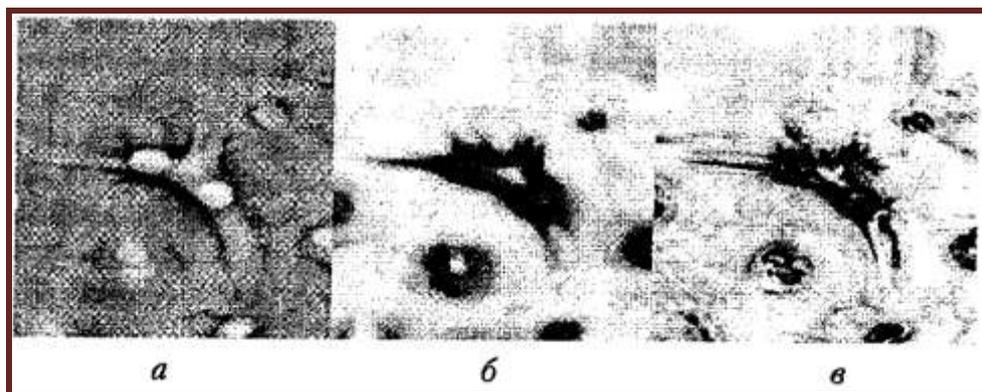


Рис. 5. Изображение образца, полученное в микроскопах: обычном (а), конфокальном (б), конфокальном с коррекцией (в) (по материалам источника [5]).

Медицина.

Применение методов адаптивной оптики в медицине направлено на решение двух основных задач — это измерение аберраций в глазу человека и коррекция этих аберраций. Отметим, что этой тематике посвящено достаточно большое количество исследований, проводимых в европейских странах и Китае.

Решение первой задачи обычно выполняется с использованием датчика Гартмана. На основе теоретических и экспериментальных исследований в работе Артала П., Арагона Дж. и Прето П. «Датчик волнового фронта Шака-Гартмана для человеческого глаза: точность и технические пределы» были сформулированы следующие общие требования к прибору, предназначенному для измерения искажений хрусталика:

- измерение полиномов Цернике до 8-го порядка;
- датчик должен работать в статическом и динамическом режимах, в динамическом режиме частота не менее 30 Гц;
- точность измерения волнового фронта не менее 0,01 мкм.

Прибор (см. рис. б), практически полностью удовлетворяющий этим требованиям, был построен в Китае.

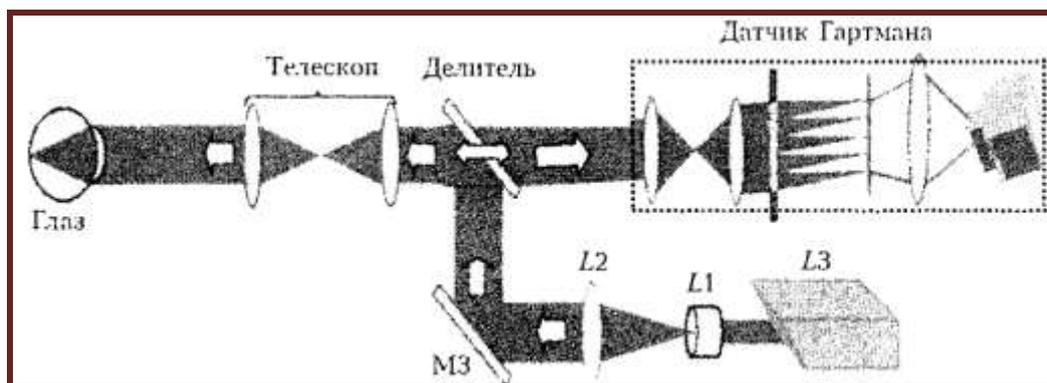


Рис. 6. Оптическая схема прибора, предназначенного для измерения аберраций в человеческом глазу (по материалам [5]).

В используемой авторами оптической схеме пучок от лазерного источника L3 через систему оптических элементов направляется в глаз человека. Отраженное от сетчатки излучение, проходя телескоп и делитель излучения, попадает в датчик Шака-Гартмана, измеряющий аберрации волнового фронта. Комплекс обладает следующими характеристиками: возможность измерения первых 35 полиномов Цернике, частота работы 25 Гц, ошибка измерений $\lambda/7$.

Эксперименты по коррекции зрения, в которых участвовали два человека, были проведены группой английских исследователей. Искажения вносились искусственно с помощью специально введенной в оптический тракт офтальмологической линзы. В результате исследований было выявлено, что адаптивная система позволяет получить коррекцию аберраций, если их величина не превосходит 1,5 диоптрий.

Тепловое самовоздействие.

В лабораторных экспериментах, проведённых Приммерманом С.А. и Фошем Д.Г., и теоретических работах, выполненных в 70-е гг., было показано, что нагрев канала распространения лазерным пучком на несколько десятых градуса приводит к изменениям показателя преломления на трассе и, как следствие, к искажениям излучения. Самовоздействие приводит к дефокусировке пучка, при наличии ветра на трассе распространения центр

тяжести излучения смещается в наветренную сторону, пучок приобретает серповидную форму.

Большое внимание в последние десятилетия XX в. уделялось проблеме коррекции тепловых искажений. За рубежом (в работах Данпли Дж., Пирсона Дж. и Смита Д.), а затем и в России (Кандидов В.П., Криндач Д.П. «Адаптивная система фазовой компенсации нелинейных искажений при тепловом самовоздействии пучка») было проведено несколько успешных лабораторных экспериментов по компенсации самовоздействия. В качестве примера здесь возможно привести работу Джона Пирсона, которому в результате фазового управления пучком удалось увеличить интенсивность излучения в плоскости наблюдения в 2—4 раза. Эксперименты сопровождались теоретическими исследованиями, развитием методов коррекции искажений, анализом возможностей снижения искажающих воздействий за счет подбора параметров излучения [5].

Атмосферная турбулентность.

Еще одним искажающим фактором, оказывающим влияние на распространяющееся в атмосфере излучение, являются неоднородности показателя преломления воздуха, возникающие при турбулентном движении среды. Линзы, сформировавшиеся случайным образом в атмосфере, вызывают значительные искажения лазерных пучков и изображений в наземных телескопах, случайные изменения направления лучей.

Для уменьшения искажающего влияния атмосферы, как и при компенсации теплового самовоздействия, обычно используются адаптивные системы, в которых осуществляется управление фазой излучения. Так, М.А. Воронцовым построена и экспериментально исследована установка, имеющая 37 каналов управления. Так же, как при апертурном зондировании, информацией, вводимой в алгоритм, являются данные о распределении поля в плоскости наблюдения. Теоретически показано, что данный метод обеспечивает определение максимума целевой функции за 10—20 шагов. Аналогичные результаты были получены Брентом Еллерброком,

исследовавшим управление в системе, имеющей несколько тысяч каналов управления.

Дальнейшее повышение скорости компенсации искажений достигается при прогнозировании возможных искажений и формировании корректирующего фазового профиля на основе такого прогноза. Улучшить временной режим адаптивной системы позволяют прогнозирующие алгоритмы, исследование которых проводились В. П. Лукиным и другими авторами (Дессен Ц., Мейдес П., Россет Дж., Гибсон Дж, Чанг С.). Во всех случаях наблюдалось повышение качества компенсации турбулентных искажений лазерных пучков [5].

Проекты адаптивных систем современных телескопов

Одно из направлений исследований в данной области — это улучшение характеристик существующих адаптивных систем без изменения их структуры, прежде всего, увеличение числа степеней свободы управляемого зеркала и повышение точности датчика волнового фронта. Так, международной группой ученых в 2001 году разрабатывалось зеркало, предназначенное для работы в оптической системе 6,5-метрового телескопа.

Целью данного проекта является не только увеличение числа степеней свободы, но и достижение ряда преимуществ по сравнению с биморфными корректорами. В частности, зеркало является одновременно управляемым и используется в качестве вторичного. Динамический диапазон (амплитуда смещения актюаторов) позволяет отказаться от дополнительного корректора, обеспечивающего компенсацию наклонов. Все это дает возможность сократить число оптических элементов в схеме. И еще одно преимущество по сравнению с биморфом — это отсутствие гистерезиса.

Увеличить эффективность адаптивной компенсации искажений возможно также за счет повышения точности регистрации волнового фронта, т.е. при модификации датчика волнового фронта [5].

ТЕМА 5. Математический аппарат для описания оптического изображения и формирующей его системы

Основные вопросы темы: Идеальная тонкая линза и её свойства. Поле в фокальной плоскости линзы. Обобщённая функция зрачка. Простейшая изображающая система. Функция распределения поля в изображении точечного источника. Функция отклика изображающей системы. Функция рассеяния линии. Применение аппарата преобразования Фурье для описания оптической системы как фильтра пространственных частот. Распределение освещённости в идеализированном и действительном изображениях.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с математическим аппаратом, используемым для характеристики свойств изображений, получаемых на выходе оптической системы любой сложности. При этом затрагиваются именно те функции и математические приёмы, которые являются ключевыми для понимания принципов функционирования АОС.

Основной понятийно-терминологический аппарат: тонкая линза, оптическая трасса, освещённость, фокальная плоскость, зрачок, функция рассеяния линии, функция рассеяния точки, преобразование Фурье, свёртка функций.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, понимать общность математического аппарата, используемого для различных схем оптических систем, знать принципы гармонического анализа, иметь представление о свёртке функций и разложении функций в ряд Фурье.

ТЕМА 6. Оптическая передаточная функция

Основные вопросы темы: Зрачковая функция и её связь с функцией Грина для оптической системы. Геометрическая интерпретация оптической передаточной функции. Модуляционно-передаточная функция. Оптическая передаточная функция при центральном экранировании зрачка оптической системы, алгоритм её вычисления. Передаточная функция дифракционно-ограниченной системы. Передаточная функция системы с aberrациями. Роль фазовых множителей при определении оптической передаточной функции.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с понятием оптической передаточной функции, являющейся одной из ключевых характеристик качества оптической системы. Должны быть изучены основные математические формулы, описывающие данную функцию, и их физическая интерпретация.

Основной понятийно-терминологический аппарат: зрачковая функция, модуляционно-передаточная функция (частотно-контрастная характеристика), функция Грина, виньетирование.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать связь физических свойств оптической системы с формализмом функции Грина, уметь применять операцию свёртки функций, знать и уметь применять операции над множествами, знать расчётные формулы планиметрии, уметь выполнять преобразование Фурье.

ТЕМА 7 Зеркала с синтезированной апертурой

Основные вопросы темы: Проблема получения зеркал с большой апертурой. Телескопы в виде сочетания отдельных телескопов. Световое возмущение в изображении осевой точки для синтезированных апертур в различных системах координат. Аналогия с интерферометром Майкельсона. Смещение поверхности зрачка вдоль оси симметрии в звёздном интерферометре Майкельсона. Модуляционно-передаточная функция системы звёздного интерферометра Майкельсона.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с решением задачи увеличения апертуры оптических приборов, используемых в астрофизических исследованиях. Должны быть изучены базовые принципы расчёта модуляционно-передаточной функции для систем с апертурой, формируемой из нескольких зеркал или телескопов. Должна быть осознана роль адаптивной оптики в решении данной задачи.

Основной понятийно-терминологический аппарат: синтезированная апертура, составной телескоп, звёздный интерферометр Майкельсона, модуляционно-передаточная функция, функции Бесселя, световой возмущение.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, знать понятие модуляционно-передаточной функции, иметь представление о функциях Бесселя первого рода, быть знакомым с конструкцией и принципами работы интерферометра Майкельсона, знать правила перехода между системами координат различного типа (декартова, сферическая, цилиндрическая).

Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 5–7

В рамках лекционного курса рассматривается в первую очередь математический аппарат, используемый при анализе изображений, формируемых оптическими системами. Однако работа АОС невозможна без автоматизированной обработки сигналов, получаемых от отдельных её элементов, таких как датчики волнового фронта и адаптивные зеркала. В связи с тем, что основной акцент курса сделан на датчиках Шака-Гартмана и биморфных пьезоэлектрических адаптивных зеркалах, далее рассмотрим базовые алгоритмические, математические и физические принципы, используемые при работе именно с такими элементами АОС.

Анализ гартманограмм.

Гартманограмма – это изображение (обычно точечного формата *.bmp* [6]), формируемое светочувствительными элементами ПЗС-камеры, расположенной в фокальной плоскости линзового растра датчика волнового фронта.

Линзовый растр – тонкая непрозрачная пластина с расположенными на равном расстоянии друг от друга отверстиями, в которые установлены микролинзы с одинаковым фокусным расстоянием.

Основным элементом ПЗС-камеры является ПЗС-матрица – интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов. Чем выше интенсивность света, попадающего на пиксель матрицы, тем выше итоговый заряд, снимаемый с него. ПЗС-камерой формируется изображение, пиксели которого имеют яркость, пропорциональную величине заряда с соответствующих пикселей матрицы.

В результате на компьютер для дальнейшей обработки поступает изображение гартманограммы, вид которой представлен на рис. 7.

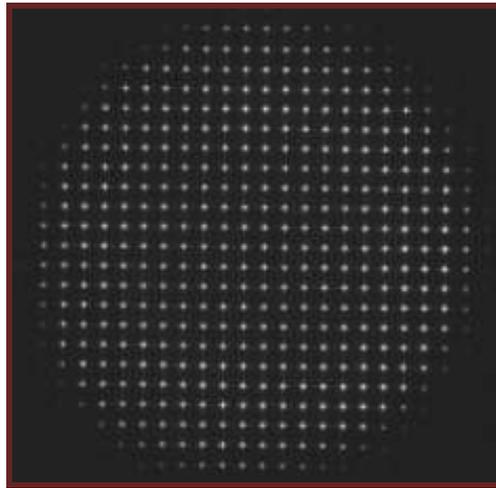


Рис. 7. Пример гартманогаммы

Далее, прежде всего, необходимо вычислить центры фокальных пятен. Координаты центров определяются алгоритмом «центра масс». В соответствии с ним координаты центра пятна с номером i вычисляются по формулам:

$$x_i = \frac{\sum_{x_{ik} \in A_i} x_{ik} \tilde{I}_{ik}}{\sum_{x_{ik} \in A} \tilde{I}_{ik}}, \quad y_i = \frac{\sum_{y_{ik} \in A_i} y_{ik} \tilde{I}_{ik}}{\sum_{y_{ik} \in A} \tilde{I}_{ik}},$$

где \tilde{I}_{ik} - распределение интенсивности в окрестности фокального пятна i .

Чтобы применить метод «центра масс», необходимо знать окрестности каждого из фокальных пятен, в которых будет осуществляться анализ интенсивности. Для определения этих окрестностей можно использовать следующий алгоритм.

По умолчанию устанавливается минимальный порог яркости фокального пятна в пределах от 0 до 1. Это необходимо для корректной работы алгоритма, поскольку в реальной системе в той или иной степени происходит засветка практически каждого пиксела ПЗС-матрицы. При установке порога яркости алгоритм при анализе пикселя на предмет его

принадлежности к фокальному пятну, будет игнорировать пиксели с засветкой, меньшей порогового значения.

Поданная на вход алгоритму гартманограмма анализируется попиксельно, и при нахождении «светлого» пикселя определяется некоторая область вокруг него. Проходя попиксельно эту область, находятся все светлые пиксели (с интенсивностью выше порога) в ней и их координаты, а также запоминается их яркость. Далее применяется алгоритм поиска координат пикселя с максимальной яркостью, которая будет соответствовать максимальной интенсивности излучения в данной области. Координаты найденного центра заносятся в массив, и алгоритм продолжает просмотр изображения с небольшим смещением относительно только что изученной области вправо, чтобы не затрагивать уже проанализированные пиксели. При последующем нахождении светлого пикселя его координаты сверяются с координатами предыдущих найденных светлых пикселей, занесённых в отдельный массив. Если совпадений нет, то вокруг этого пикселя формируется область, и алгоритм повторяется.

При необходимости более наглядного представления неравномерного распределения фокальных пятен искажённого волнового фронта на изображение (референс и фазу) наносится сетка. Сетка (рис. 8) представляет собой набор квадратов вокруг фокальных пятен, удовлетворяющих порогу яркости.

Непосредственно перед коррекцией волнового фронта необходимо снять референс и функции отклика электродов (подробнее о функциях отклика рассказано ниже).

Референс – это волновой фронт излучения, принимаемый за идеальный в данной системе. В идеале – это плоский волновой фронт. Однако, в любой реальной неизолированной системе между элементами адаптивной системы имеется среда, которая способна вносить искажения в волновой фронт излучения. Тем не менее, эти искажения, как правило, либо достаточно малы,

либо относительно постоянны, чтобы существенно влиять на результат измерений.

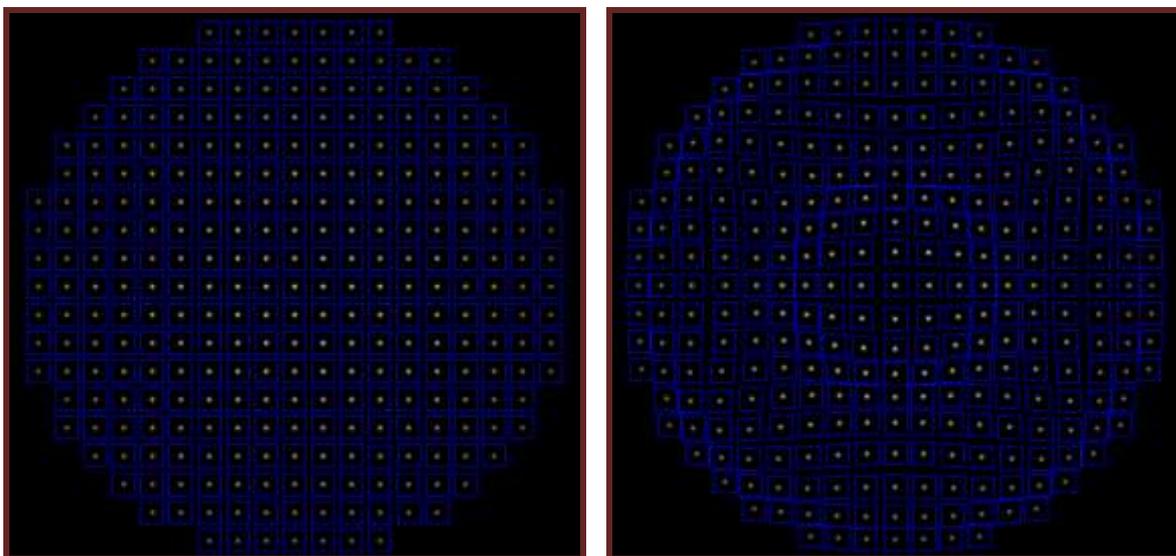


Рис. 8. Сетка, нанесённая на референс (слева) и на фазу (справа)

Последним этапом работы, связанным с гартманограммами, является вычисление смещений. Смещения фокальных пятен записываются как массивы разностей координат центров фокальных пятен референса и фазы по двум осям – x и y .

Функции отклика электродов адаптивного зеркала.

Возможные схемы расположения электродов адаптивного зеркала были представлены выше, на рис. 3. Функция отклика электрода представляет собой результат деформации поверхности адаптивного зеркала от приложения единичного напряжения только к данному электроду. Как только профиль поверхности зеркала изменяется, датчик волнового фронта фиксирует смещение фокальных пятен от референсных положений. Именно этими смещениями по двум осям и характеризуются функции отклика.

Таким образом, последовательным приложением напряжений ко всем электродам адаптивного зеркала вычисляются смещения фокальных пятен для всех функций отклика.

Графически функции отклика можно представить в виде интерферограмм – двумерных изображений линий равной фазы профиля волнового фронта светового излучения. Две функции отклика для зеркала с 33 электродами (с рис. 3) представлены на рис. 9.

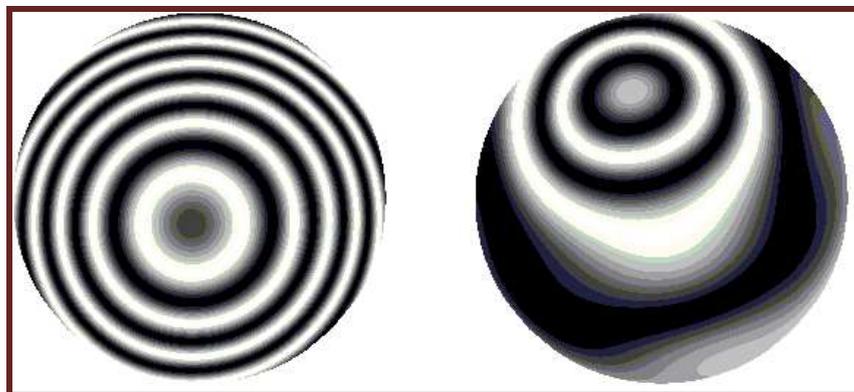


Рис. 9. Функция отклика для первого (слева) и для семнадцатого (справа) электродов

Сформированные в виде массива смещений функции отклика сохраняются в отдельный файл. Также, помимо функций отклика, в этот файл записывается информация о референсе (массив центров фокальных пятен референсного волнового фронта), о координатах прямоугольных окрестностей фокальных пятен для сетки, о радиусе пучка излучения и о технических характеристиках системы, таких как количество электродов адаптивного зеркала, фокусное расстояние линзового раstra, размер пикселя ПЗС-камеры, длина волны излучения.

Использование полиномов Цернике.

Для того чтобы исследовать влияние aberrаций, необходимо иметь достаточно полное численное представление функции волновой aberrации. Такую функцию $W(\rho)$ описывают в виде разложения по некоторому базису от координат апертуры:

$$W(\rho) = \sum_k c_k \cdot P_k(\rho),$$

где $P_k(\rho)$ - функция базиса.

Для описания аберраций оптических систем используется два вида базисов. *Степенной базис* состоит из функций $\rho_x^i \rho_y^j$, но чаще выражается в полярных координатах:

$$W(\rho) = \sum_i \sum_j W_{ij} \cdot \rho^i \cdot \cos^i \varphi,$$

где $i \geq j, i + j = 2k$.

Второй вид - *ортогональный базис* в виде полиномов Цернике [7]. Полиномы Цернике – это полиномы, ортогональные на круге единичного радиуса. Они могут быть получены из формулы следующего вида:

$$R_n^{n-2m}(\rho) = \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \cdot (m-s)! \cdot (n-m-s)!} \cdot \rho^{n-2s},$$

где n – степень полинома; $n-2m$ – параметр угловой зависимости; ρ – нормированное радиальное расстояние.

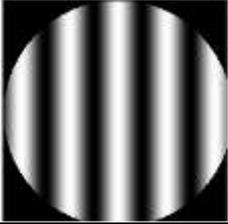
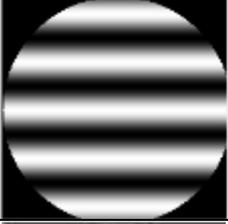
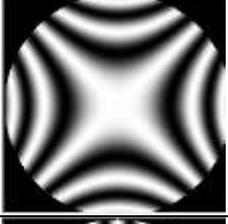
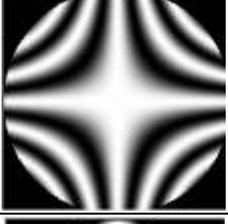
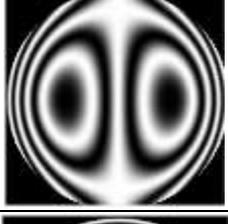
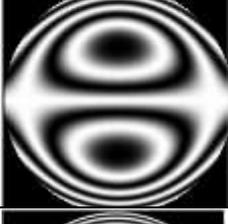
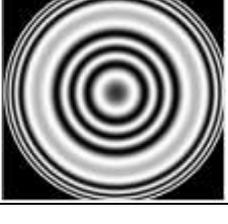
Любую функцию волнового фронта $W(\rho, \theta)$ можно представить в виде линейной комбинации круговых полиномов Цернике:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} R_n^{n-2m} \begin{cases} \sin \\ \cos \end{cases} (n-2m) \cdot \theta,$$

где \sin соответствует $(n-2m) > 0$, а \cos соответствует $(n-2m) \leq 0$. Число m определяют как $m = (n-l)/2$ [8].

Одно из преимуществ использования полиномов Цернике для представления волнового фронта заключается в том, что каждый полином, каждый член разложения представляет собой оптимальную форму классической аберрации (табл. 1).

Представление aberrаций полиномами Цернике

<i>№</i>	<i>Полином</i>	<i>Значение</i>	<i>Изображение</i>
R_1^1	$\rho \cdot \sin \theta$	Наклон по оси x	
R_1^{-1}	$\rho \cdot \cos \theta$	Наклон по оси y	
R_2^2	$\rho^2 \cdot \sin 2\theta$	Астигматизм $\pm 45^\circ$	
R_2^{-2}	$\rho^2 \cdot \cos 2\theta$	Астигматизм 90°	
R_3^1	$(3\rho^3 - 2\rho) \cdot \sin \theta$	Кома 3-го порядка по оси x	
R_3^{-1}	$(3\rho^3 - 2\rho) \cdot \cos \theta$	Кома 3-го порядка по оси y	
R_4^0	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Сферическая абберация 3-го порядка	

Коэффициенты при полиномах Цернике служат численным представлением aberrаций для данной точки предмета и данной длины волны излучения. Изображения (модельные aberrации), приведённые в таблице, получены именно по этому принципу: для наклонов по осям первый или второй коэффициенты устанавливались в значение 1, для астигматизмов – третий или четвёртый, для ком – пятый или шестой, для сферической aberrации – седьмой, а остальные коэффициенты соответственно устанавливались в значение 0.

Сферическая aberrация и кома относятся к aberrациям, обусловленным широкими пучками лучей. В этом случае источник излучения находится либо на оптической оси системы (для сферической aberrации), либо на небольшом расстоянии от неё (для комы). В результате сферической aberrации точка, расположенная на оптической оси, после прохождения системы изображается как отрезок, также расположенный на оптической оси, а на экране, расположенном перпендикулярно оси – как круг рассеяния с неоднородным распределением интенсивности. В случае комы, изображение точки преобразуется в изображение неравномерно освещённого пятна, несколько напоминающее комету с хвостом (откуда и произошло название этой aberrации) [9, с.277-281].

Астигматизм – aberrация, обусловленная тонкими внеосевыми наклонными пучками лучей. В этом случае угол между осью пучка и оптической осью системы достаточно велик. Изображением точки являются две фокальные линии в перпендикулярных направлениях [9, с.277-281].

Для представления фазового распределения в виде интерференционной картины необходимо рассчитать значение фазы в каждой точке. Значение фазы в точке (x, y) может быть вычислено по формуле:

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^{WP} A_i \cdot W_i(x, y), \quad (1)$$

где WP – число полиномов Цернике;

A_i - коэффициенты при полиномах Цернике;

$W_i(x, y)$ - значение i -го полинома в точке (x, y) .

А непосредственно распределение интенсивности в каждой точке вычисляется по формуле:

$$I(x, y) = 127.5 \cdot [1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \varphi(x, y))], \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения [1].

Как было отмечено выше, значения полиномов Цернике представляют ту или иную волновую aberrацию, в то время как их производные по пространственным координатам определяют локальные наклоны волнового фронта (так называемая поперечная aberrация). На рис. 10 схематично изображена одиночная линза микролинзового раstra ПЗС-камеры и смещение фокального пятна от референсного положения вследствие локального наклона волнового фронта, причиной которого являются искажения пучка света.

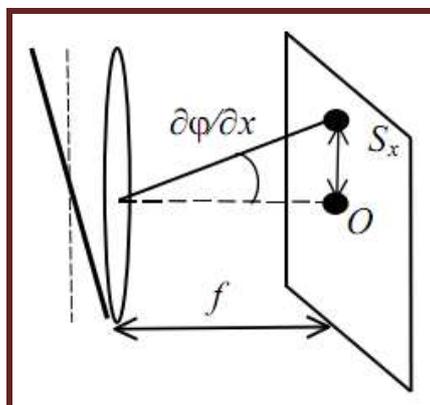


Рис. 10. Локальный наклон волнового фронта

Из рисунка видно, что смещение центра фокального пятна по оси x пропорционально тангенсу угла наклона волнового фронта, то есть $\frac{\partial\varphi}{\partial x}$. Для смещения по оси y всё аналогично.

Если имеется N субапертур, на которые падает пучок света, пронумерованных от 1 до N , координаты центров референса заданы как:

$\{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0N}\}$, $\{y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0N}\}$ и координаты центров фокальных пятен для волнового фронта с aberrациями $W(x, y)$: $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, то локальные наклоны волнового фронта вычисляются следующим образом:

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = S_x^i = \frac{x_i - x_{0i}}{f}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = S_y^i = \frac{y_i - y_{0i}}{f}, \quad (4)$$

где $i=1, \dots, N$, f - фокусное расстояние линз раstra.

Поскольку центры фокальных пятен для референсного и для искажённого волнового фронта найдены и фокальное расстояние линзового раstra известно, то величины смещений определяются однозначно.

В то же время, согласно формуле (1), локальный наклон волнового фронта в точке (x_k, y_k) можно представить в виде:

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \sum_{i=1}^{WP} A_i \frac{\partial W_i(x_k, y_k)}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \sum_{i=1}^{WP} A_i \frac{\partial W_i(x_k, y_k)}{\partial y}. \quad (6)$$

Таким образом, объединяя правые части (3) и (4) в вектор значений, (5) и (6) в конструкционную матрицу, а затем, приравнивая их, можно определить коэффициенты при полиномах Цернике, например, методом наименьших квадратов. Это даст возможность построить картины распределения интенсивности для данного волнового фронта и наглядно представить искажения [1].

ТЕМА 8. Способы оценки качества изображения, формируемого оптической системой

Основные вопросы темы: световое возмущение в параксиальном приближении точки, среднеквадратическая деформация волнового фронта, формула Марешаля, допуск Марешаля для малых аберраций, влияние малых аберраций на функцию рассеяния точки, число Штреля, критерий Релея для малых аберраций.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с функциями и математическими выражениями, используемыми для оценки качества изображения, формируемого оптической системой. Студент должен понять принципы вычисления и использования рассмотренных критериев для оптических систем различного типа.

Основной понятийно-терминологический аппарат: число Штреля, малые аберрации, релеевский допуск на остаточные аберрации, формула Марешаля.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, уметь выполнять разложение функций в степенные ряды, понимать математический аппарат кратных интегралов, понимать принципы вычисления среднеквадратичных величин, понимать физический смысл таких характеристик как освещённость, параксиальное изображение, аберрация.

ТЕМА 9. Технологии создания узлов адаптивных оптических систем

Основные вопросы темы: Технологии изготовления адаптивных зеркал (корректоров волнового фронта): сегментированные зеркала, мембранные зеркала, микроэлектромашинные зеркала (MEMS), поршневые зеркала, жидкокристаллические модуляторы, биморфные деформируемые зеркала. Адаптивный принцип формообразования зеркал. Технологии изготовления датчиков для АОС: датчик Шака-Гартмана, M^2 -датчик. Принципы создания электронной системы управления корректором волнового фронта. Проблемы юстировки адаптивных оптических систем. Сопряжение АОС с современной вычислительной техникой.

Цель и задачи изучения темы состоят в ознакомлении студента с технологиями изготовления отдельных узлов и модулей АОС: адаптивных зеркал, датчиков Шака-Гартмана и M^2 -датчиков, электронных блоков управления. Должны быть разобраны ключевые проблемы получения качественной поверхности корректоров волнового фронта и методы их решения. Студенты должны познакомиться также с современными способами подключения элементов АОС к компьютерной технике.

Основной понятийно-терминологический аппарат: качество оптической поверхности, адаптивное зеркало, интерференционный способ контроля качества поверхности, фотополимеризация, пьезоэлектрические элементы, универсальная последовательная шина.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, знать общую структуру адаптивных оптических систем, понимать назначение и функционирование отдельных элементов АОС.

Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 8–9

Важной технологической частью создания системы коррекции волнового фронта является разработка программных управляющих модулей. Данная часть системы хотя и не является материальной, но трудоёмкость и интеллектуальная составляющая её создания являются наиболее весомыми в общем жизненном цикле изготовления АОС. В рамках лекционного курса рассматриваются общетеоретические принципы оценки качества формируемого оптической системой изображения, а также вопросы технологий изготовления материальных компонентов АОС. Здесь же приводятся для самостоятельного изучения ключевые положения алгоритмизации процесса оценки качества изображения и организации обратной связи с системой управления адаптивным зеркалом.

Использование метода наименьших квадратов для вычисления коэффициентов при полиномах Цернике.

Метод наименьших квадратов (МНК) является наиболее эффективным с точки зрения качества результата и быстродействия при решении отдельных задач реализации автоматической обработки изображений, формируемых оптической системой. Использование метода наименьших квадратов обусловлено тем, что данные для него (вектор смещений фокальных пятен) получают экспериментальным путём, а значит, не точны и имеют погрешность измерений. То есть обычная интерполяция в данном случае не может дать адекватных результатов, поскольку в этом случае ошибка расчёта искомого вектора будет несоизмеримо большой. А применение метода наименьших квадратов позволяет использовать дополнительную, избыточную информацию, что приводит к существенному уменьшению ошибки.

Далее рассмотрим более детально, где и как применяется МНК.

Во-первых, это вычисление коэффициентов при полиномах Цернике для искажённого волнового фронта. Это необходимо для отображения картин распределения интенсивности и для расчёта напряжений по модифицированному алгоритму фазового сопряжения.

Коэффициенты находятся из следующего соотношения:

$$A = (dW^T \cdot dW)^{-1} \cdot dW^T \cdot S,$$

где dW – матрица значений производных полиномов Цернике по пространственным координатам в центрах фокальных пятен;

dW^T – транспонированная матрица значений производных;

S – матрица смещений фокальных пятен от референса.

Соответственно, матрицы для метода наименьших квадратов вычисляются следующим образом:

$$dW^T dW = \begin{pmatrix} FS & \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_1(x_i, y_i)}{\partial x} & \dots & \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_p(x_i, y_i)}{\partial x} \\ \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_1(x_i, y_i)}{\partial x} & \sum_{i=1}^{FS} \left(\frac{\partial W_1(x_i, y_i)}{\partial x} \right)^2 & \dots & \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_1(x_i, y_i)}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_p(x_i, y_i)}{\partial x} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_p(x_i, y_i)}{\partial x} & \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_p(x_i, y_i)}{\partial x} \cdot \frac{\partial W_1(x_i, y_i)}{\partial x} & \dots & \sum_{i=1}^{FS} \left(\frac{\partial W_p(x_i, y_i)}{\partial x} \right)^2 \end{pmatrix},$$

$$dW^T \cdot S = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{FS} S_x^i \\ \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_1(x_i, y_i)}{\partial x} \cdot S_x^i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{FS} \frac{\partial W_p(x_i, y_i)}{\partial x} \cdot S_x^i \end{pmatrix}.$$

Во-вторых, МНК применяется для вычисления коэффициентов при полиномах Цернике для функций отклика электродов. Поскольку каждая функция отклика представлена в виде смещений, и известны центры фокальных пятен референса, то можно применить рассмотренный выше

алгоритм нахождения коэффициентов. С помощью вычисленных коэффициентов также можно отобразить функции отклика в виде интерференционных картин (пример на рис. 9 выше).

В-третьих, МНК применяется для расчёта напряжений, как в алгоритме фазового сопряжения, так и в модифицированном алгоритме фазового сопряжения, которые будут описаны ниже.

И, наконец, метод наименьших квадратов применяется для вычисления коэффициентов Цернике для восстановленного, «скорректированного» волнового фронта на основании найденных управляющих напряжений.

Алгоритм фазового сопряжения.

Известный и используемый алгоритм вычисления управляющих напряжений заключается в следующем. Любое искажение волнового фронта, представленное в виде смещений центров фокальных пятен, может быть представлено как суперпозиция функций отклика электродов адаптивного зеркала:

$$S = \sum_{j=1}^{NE} U_j \cdot RF_j, \quad (7)$$

где NE – число электродов адаптивного зеркала;

S – матрица смещений фокальных пятен для компенсируемого волнового фронта;

U – вектор управляющих напряжений;

RF – матрица функций отклика.

Коэффициентами для этого разложения будут являться управляющие напряжения, которые необходимо найти по методу наименьших квадратов.

Т.к. смещения функций отклика обычно измеряются в величинах $\frac{\text{пиксель}}{\text{Вольт}}$, смещения фокальных пятен – в пикселях, а искомые напряжения – в вольтах, то в единицах измерения правой и левой частей разногласий нет. Данный алгоритм описан в статье [1].

Модифицированный алгоритм фазового сопряжения.

Алгоритм фазового сопряжения для поиска управляющих напряжений основывается на использовании смещений фокальных пятен. Однако, как было показано выше, смещения – это производные функции профиля волнового фронта.

Предположим, что все предварительные вычисления, как то – определение центров референса, центров искажённого волнового фронта, расчёт смещений фокальных пятен, считывание данных о функциях отклика электродов и расчёт коэффициентов при полиномах Цернике для текущего искажённого фронта и для всех функций отклика – были сделаны.

Поскольку в любом случае в вычислении управляющих напряжений участвуют смещения фокальных пятен и функции отклика электродов, то можно представить их не в виде смещений, а в виде значений фазы. То есть необходимо сделать следующее.

- 1) Для каждого центра фокального пятна гартманогаммы искажённого волнового фронта вычислить значение фазы по формуле (1).
- 2) Для каждой функции отклика электродов рассчитать значение фазы в каждом фокальном пятне по формуле (1).

Таким образом, получится система с вектором фаз для корректируемого волнового фронта в левой части и матрицей фаз для функций отклика в правой. Коэффициентами разложения по-прежнему будут являться искомые управляющие напряжения (формула (8)).

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1^1 & \varphi_2^1 & \cdots & \varphi_N^1 \\ \varphi_1^2 & \varphi_2^2 & \cdots & \varphi_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1^{RF} & \varphi_2^{RF} & \cdots & \varphi_N^{RF} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где φ_i - значение фазы для i -й точки гартманогаммы искажённого волнового фронта;

U_i - управляющее напряжение на i -м электроде;

φ_i^j - значение фазы в i -м центре j -й функции отклика;

N – число фокальных пятен;

RF – число функций отклика.

Таким образом, значения смещений будут заменены наборами значений фаз, и методом наименьших квадратов будет минимизироваться уже функционал разности значений функции профиля волнового фронта.

Метод восстановления волнового фронта.

После нахождения управляющих напряжений на электродах адаптивного зеркала необходимо проверить качество коррекции волнового фронта. Умножив смещения одного фокального пятна для каждой функции отклика на соответствующие вычисленные управляющие напряжения и просуммировав значения по всем функциям отклика, получим «корректирующие» смещения для данного фокального пятна. Аналогичную процедуру необходимо проделать со всеми остальными фокальными пятнами.

Таким образом, «корректирующие» смещения будут найдены, и если вычесть из смещений фокальных пятен анализируемой гартманогаммы (гартманогаммы с искажённым волновым фронтом) «корректирующие» смещения, то результатом будут смещения центров фокальных пятен для скорректированного волнового фронта от референсного:

$$\begin{pmatrix} S_1^{corrected} \\ S_2^{corrected} \\ \vdots \\ S_N^{corrected} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1^{phase} - \sum_{i=1}^{RF} U_i \cdot S_{i1}^{resp} \\ S_2^{phase} - \sum_{i=1}^{RF} U_i \cdot S_{i2}^{resp} \\ \vdots \\ S_N^{phase} - \sum_{i=1}^{RF} U_i \cdot S_{iN}^{resp} \end{pmatrix},$$

где $S_i^{corrected}$ - «скорректированные» смещения i -го фокального пятна;

S_i^{phase} - значения смещений для i -го фокального пятна анализируемой гартманогаммы;

U_i - управляющее напряжение на i -м электроде;

S_{ij}^{resp} - смещения j -го фокального пятна i -й функции отклика;

N – число фокальных пятен;

RF – число функций отклика.

На основании полученных смещений известным образом можно найти коэффициенты при полиномах Цернике для скорректированного волнового фронта и построить картину распределения интенсивности.

В идеале она должна быть плоской, но в связи с тем, что напряжение на электродах измеряется с точностью до 1 вольта и в связи с явлением гистерезиса адаптивного зеркала приемлемые корректирующие напряжения находятся, как правило, за 3-4 итерации.

Вопросы и задания для самоконтроля по теоретическому материалу

1. Как атмосферная турбулентность влияет на астрономические телескопы, и чем может помочь адаптивная оптика?
2. Получить явный вид модуляционно-передаточной функции, выполнив Фурье-преобразование функции отклика оптической системы для пустого пространства.
3. Может ли существовать точечный когерентный источник, и когда справедлива подобная идеализация?
4. Выразить число Штреля через оптическую передаточную функцию системы и объяснить результат.
5. Оценить необходимую точность изготовления решётки Ронки, исходя из допустимого уровня «чётных» гармоник.
6. Специфика измерения искажений волнового фронта в адаптивной оптике. Принципы работы основных датчиков волнового фронта.
7. Принципиальные ограничения точности измерения волнового фронта: дробовой шум фотонов.
8. Интерферометры поперечного сдвига: основные соотношения.
9. Гетеродинный интерферометр поперечного сдвига на вращающихся дифракционных решётках: принцип действия, параметры.
10. Гетеродинный интерферометр с совмещёнными решётками.
11. Гартмановский датчик волнового фронта. Устройство, принцип работы, позиционная характеристика, чувствительность измерений.
12. Общие принципы восстановления волнового фронта по измерениям локальных наклонов, случай непрерывных (по пространству) измерений. Влияние шумов измерений.
13. Восстановление волнового фронта по измерениям локальных наклонов

- в случае дискретных измерений. Однозначность восстановления волнового фронта. Схемы Фрида и Хаджина.
14. Восстановление волнового фронта методом наименьших квадратов.
 15. Разложение волнового фронта по функциям отклика корректора, метод наименьших квадратов.
 16. Основные параметры адаптивных корректоров волнового фронта, их классификация.
 17. Сравнительный анализ сегментированных корректоров и корректоров со сплошной гибкой поверхностью.
 18. Устройство и сравнительные характеристики (чувствительность и рабочий диапазон частот) приводов различного типа.
 19. Устройство и сравнительные характеристики биморфных пьезоэлектрических зеркал и мембранных корректоров волнового фронта.
 20. Пример ортогонализации функций отклика корректора.
 21. Чем отличаются адаптивные оптические системы фазового сопряжения и апертурного зондирования? Преимущества и недостатки каждого из видов систем.
 22. Критерии качества работы адаптивных систем. Их оптимизация.
 23. Методы оптимизации критерия качества изображения.
 24. Сущность многоканальной фазовой модуляции и проблемы её реализации.
 25. Обобщённая схема адаптивной системы с оптической обратной связью.
 26. Устройство и характеристики жидкокристаллического транспаранта с оптическим управлением.
 27. Устройство и характеристики адаптивных оптических систем с «фазовым ножом».

28. Устройство и характеристики адаптивных оптических систем со сдвиговым интерферометром и голографическим фильтром.
29. Принцип действия фильтра Цернике. Особенности нелинейного фильтра Цернике.

Список литературы:

1. Александров А.Г., Завалова В.Е., Кудряшов А.В. и др. Адаптивная коррекция излучение мощного титан-сапфирового лазера // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 72. – № 5. – С. 679 – 680.
2. Тараненко В.Г., Шанин О.И. Адаптивная оптика. – М.: Радио и связь, 1990. – 112 с.
3. Воронцов М.А., Кудряшов А.В., Шмальгаузен В.И. // Известия вузов. Радиофизика. – 1984. – Т.27. – С. 1419 – 1429.
4. Токовинин А.В.// Учебное пособие по адаптивной оптике обсерватории Сьерро Тололо; Пер. Д.Ю.Цветкова. // Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1205112/part1/turb.html#SEC1.6>
5. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования: Монография. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. – 250 с.
6. Bitmap Storage. Статья MSDN. // Режим доступа: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd183391\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd183391(v=vs.85).aspx)
7. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 270 с.
8. Оптический производственный контроль/ Под ред. Д. Малакары; Пер. с англ. Е.В. Мазуровой и др.; Под ред. А.Н. Соснова. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
9. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
10. Ермолаева Е.В., Зверева В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика: Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.

11. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования: Монография. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. – 250 с.
12. Шмальгаузен В.И., Корябин А.В. Современные проблемы адаптивной оптики. Курс лекций. // Режим доступа: http://www.optics.ru/rus_general.htm.
13. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. – М.: Техносфера, 2013. – 296 с.
14. Рукосуев А.Л., Кудряшов А.В., Лылова А.Н., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В., "Адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта в реальном времени", Оптика атмосферы и океана, 28(2), сс.189-195, 2015.