

Тараненко В. Г., Шанин О. И. Адаптивная оптика.—М.: Радио и связь, 1990. — 112 с.: ил. — ISBN 5-256-00742-4.

В книге изложены физические и технические аспекты адаптивной оптики — новой техники управления световым пучком в пространстве. Интерес к адаптивной оптике вызван проблематикой проектирования самых современных систем, например таких, как наземные телескопы с компенсацией атмосферного влияния на изображение, телескопы космического базирования, установки управляемого термоядерного синтеза с использованием световых импульсов, технологические лазеры и т. д.

Вызванный практической потребностью и воплощенный в адаптивной оптике синтез идей и методов породил не только массу оригинальных технологических решений, но и привел к качественно новым физическим возможностям оптики. В книге рассмотрены физические процессы распространения светового поля. Исследованы особенности системы элементов адаптивной оптики. Дано описание обращения волнового фронта на основе нелинейных оптических явлений. Представлено состояние, перспективы развития и области применения нового направления.

Для научных работников, занимающихся перспективными направлениями оптики и квантовой электроники.

Табл. 5. Ил. 59. Библиогр. 35 назв.

Рецензенты: В. Г. Дмитриев, В. Н. Шмальгаузен

Редакция литературы по информатике и вычислительной технике

Т 2302030500-047 14-90
046(01)-90

ПРЕДИСЛОВИЕ

К настоящему времени вышел ряд специальных книг, посвященных новому направлению в науке и технике — адаптивной оптике. Эти книги посвящены главным образом принципиальным, физическим аспектам данного направления.

Приступая к работе над книгой «Адаптивная оптика», авторы имели в виду по крайней мере три обстоятельства. Во-первых, физические аспекты не отражают в полной мере технические и технологические особенности создания элементов и систем адаптивной оптики. Во-вторых, техническая реализация этих элементов и систем, как правило, связана с ограниченной областью применимости. И в-третьих, адаптивная оптика объединяет широкий круг специалистов различного профиля, которым полезно представлять проблему в целом. Поэтому авторы наряду с общими проблемами адаптивной оптики значительное внимание уделили специальным, техническим вопросам.

В книге принят следующий порядок изложения. Для поверхностного представления о проблеме достаточно прочитать введение. Тот, кто хочет познакомиться с адаптивной оптикой, не вдаваясь в детали, может ограничиться первой главой. Главы вторая и третья посвящены конкретным элементам устройств, а четвертая — расчетным операциям, производимым в управляющем процессе. Альтернативный путь решения задач адаптивной оптики дан в пятой главе, а в шестой можно познакомиться с особенностями и перспективами применения адаптивной оптики в той или иной отрасли науки и техники.

Следует отметить, что авторы стремились к систематическому изложению материала, позволяющему читателю, который впервые знакомится с адаптивной оптикой, перейти к самостоятельному изучению специальной периодики.

Авторы будут благодарны специалистам, нашедшим время для ознакомления с книгой и приславшим свои замечания или уточнения.

ВВЕДЕНИЕ

В.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ И ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

Представим, что мы стоим жарким летним днем на поле и пытаемся разглядеть виднеющийся вдали предмет. Нам мешают поднимающиеся от земли потоки теплого воздуха. Сам предмет, как нам кажется, дрожит и расплывается. Причина — изменения показателя преломления света в воздушных потоках.

Допустим также, что нам необходимо осветить лучом удаленный предмет. В чистом прозрачном воздухе свет распространяется очень далеко — на 10—20 км. Однако по известной нам причине луч рассеивается и изгибается. Уже на сотне метров вместо четкого пятна света мы получаем нечто дрожащее, «амебообразное».

А теперь попробуем поставить себя на место астронома, с помощью телескопа рассматривающего небесное тело через всю толщу земной атмосферы, или на место создателей оптической спутниковой системы связи, которым необходимо обеспечить устойчивый прием оптического сигнала от источника, удаленного на сотни километров.

Нельзя ли парировать неизбежные искажения света? Забегая вперед, ответим — можно.

Проблема есть — как ее решить? Мы предлагаем придумать оптическое устройство, которое могло бы компенсировать изменения показателя преломления на пути распространения света. Например, допустим, что между нами и рассматриваемым предметом поставили вогнутую линзу и мы перестали четко видеть этот предмет. Если нельзя снять эту линзу, это ее действие можно скомпенсировать выпуклой линзой. Конечно, реальная ситуация, в которой мы находимся, решая проблему, гораздо сложнее. Искажения производятся не линзой с регулярным профилем, а как бы рифленным стеклом, причем рельеф случайным образом и очень быстро меняется. Значит, надо научиться успевать получать информацию об этом рельефе и создавать «противорельеф» или, иными словами, адаптироваться к сменяющим друг друга искажениям.

Мы с Вами на пороге адаптивной оптики [1—3]. Войдем же в этот новый, необычный, далеко еще недостроенный дом.

Прежде всего необходимо разобраться, что мы собираемся компенсировать, каковы свойства искажений и как они отразятся на требованиях к адаптивной технике.

Под оптическим диапазоном в дальнейшем будем понимать не только видимый диапазон длин волн (0,4 ... 0,7 мкм), но и ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны.

При распространении света в атмосфере искажения происходят вследствие малых флуктуаций показателя преломления воздуха. Для волн оптического диапазона главную роль в вариациях показателя преломления играют малые вариации температуры (0,1 ... 1°C), которые, в свою очередь, вызваны турбулентным перемешиванием воздуха ветром и конвекцией.

Турбулентность является случайным процессом, поэтому описывается статистически. Наиболее известной является модель турбулентности А. Н. Колмогорова. Согласно этой модели статистические свойства разности скоростей потоков в двух точках пространства зависят только от вектора разности этих точек, причем существенное значение имеет только модуль этого вектора, т. е. расстояние между точками независимо от направления. Иными словами, А. Н. Колмогоров полагал поле мелкомасштабных неоднородностей атмосферы однородным и изотропным (локально-однородная и локально-изотропная турбулентность). Заметим, что в общем случае корреляционная функция для локально-однородных полей может не существовать — так, в частности, происходит для колмогоровской модели.

Для описания флуктуаций показателя преломления n используется структурная функция

$$D_n = \langle [n(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}) - n(\mathbf{r}_1)]^2 \rangle,$$

где $\mathbf{r}_1$ — радиус-вектор точки в пространстве; угловые скобки означают усреднение по реализациям.

Структурная функция для атмосферной турбулентности подчиняется закону 2/3 Колмогорова — Обухова:

$$D_n(\mathbf{r}) = C_n^2 r^{2/3}.$$

Постоянная C_n^2 называется структурной постоянной флуктуаций показателя преломления и характеризует «силу» турбулентности. Эта постоянная зависит от метеоусловий и определяется экспериментально. Для тропосферы (приземного слоя) C_n^2 изменяется от $5 \cdot 10^{-14}$ до $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$.

Таким образом, одним из источников искажений является атмосферная турбулентность. Но не только.

Любая оптическая система, формирующая изображение или уходящий световой луч, содержит оптические элементы — линзы, плоские поворотные зеркала или зеркала телескопов, полупрозрачные зеркала, призмы и т. д. Изготовить такие элементы точно в соответствии с расчетом трудно — всегда имеются ошибки изготовления. Например, допустимая «волнистость» зеркала телескопа не должна превышать 1/20—1/100 длины волны излучения (высота неровности $\sim 0,01 \text{ мкм}$), иначе лучи в фокусе не сложатся должным образом. Кстати, этим отличается зеркало в оптическом приборе, скажем, от зеркала для бритвы. Даже если постараться исключить эти ошибки, т. е. изготовить оптические элементы с такой точностью, чтобы суммарная ошибка давала пренебрежимо

малый вклад в искажения, останется проблема деформаций этих элементов вследствие возможного изменения температуры окружающей среды, положения самого элемента относительно вектора силы тяжести, ускорения, вибраций и т. п. Наконец, если свести до минимума и эти ошибки, физически невозможно исключить взаимодействие элементов с самим светом. Правда, последний фактор пришлось принять во внимание сравнительно недавно в связи с появлением современных источников, имеющих достаточную световую энергию для того, чтобы малая часть поглощаемого элементом излучения (такое поглощение всегда имеет место даже для самых лучших стекол и зеркал) приводила к термическим деформациям элемента.

Разработчики современных систем столкнулись с еще одним, ранее не встречавшимся явлением — воздействием света на показатель преломления воздуха. В сильном световом поле происходит нагрев воздушного канала распространения за счет молекулярного поглощения света воздухом и образуется как бы рассеивающая воздушная линза.

Такое самовоздействие света приводит, в частности, к эффекту уменьшения мощности сигнала на удаленном приемнике при увеличении мощности источника. Естественно, при этом мощность источника должна быть достаточной, чтобы доля поглощенного света приводила к заметному ($0,1 \dots 1^\circ\text{C}$) изменению температуры воздушного канала.

Обратим внимание на то, что указанные вариации значения температуры фактически совпадают с теми значениями, которые приводились для атмосферной турбулентности. Однако тепловое самовоздействие влияет на световой пучок гораздо сильнее, чем турбулентность. Дело в том, что для турбулентности вариации температуры и показателя преломления принимают как положительные, так и отрицательные значения — происходит частичная взаимная компенсация. Тепловое самовоздействие приводит только к нагреву, и изменения показателя преломления дают накапливающийся эффект.

Мы выделили основные источники искажений светового луча, которые компенсируются адаптивной оптикой. Все эти искажения характерны, как можно заметить, для практически прозрачных сред. На распространении в замутненной среде, когда свет проходит через аэрозоли, вызывающие сильное рассеяние и поглощение, т. е. существенные потери амплитуды светового сигнала, мы останавливаться не будем. Короче, исключим те случаи, когда плохо видно из-за того, что свет не проходит через разделяющую нас и наблюдаемый объект среду.

Иными словами, мы ограничим наше рассмотрение только фазовыми возмущениями оптического сигнала, полагая, что возможные амплитудные возмущения на трассе вызваны наличием фазовых флуктуаций.

Напомним, что, в отличие от широко используемого нами радиосигнала, оптический сигнал имеет пространственную структуру

$A(\rho)e^{iS(\rho)}$, где $A(\rho)$, $S(\rho)$ — соответственно амплитуда и фаза сигнала, зависящие от радиуса-вектора $\rho = \{x, y\}$ в поперечном сечении пучка. Разумеется, в общем случае амплитуда и фаза зависят от времени, однако явной зависимостью сигнала от частоты излучения, как правило, можно пренебречь, поскольку оптические приемники реагируют только на интенсивность (квадрат амплитуды прошедшего сигнала) и не успевают отслеживать оптическую частоту. В свою очередь, интенсивность на приемнике зависит от фазы, так как различные лучи пучка складываются (интерferируют) друг с другом с учетом фазы. Если два одинаковых луча приходят в точку в противофазе, то интенсивность в данной точке становится равной нулю, если же в фазе, то учетверяется. Поэтому фазой пренебрегать нельзя.

Рассматривая удаленный точечный источник света, можно сделать вывод, что в отсутствие возмущений приходящая от него световая волна является плоской. Это означает, что различие между фазой в точках поперечного сечения пучка неизменно и равно нулю. Свойство сохранения фазовых соотношений между точками пространства называют когерентностью (от латинского *cohaerentia* — сцепление, связь). Если эти точки расположены в поперечном сечении пучка, то говорят о пространственной когерентности, в отличие от временной когерентности, когда точки расположены вдоль пути распространения света и излучение доходит до них в разные моменты. Временная когерентность, очевидно, всегда имеет место, если длина волны излучения источника или частота световых колебаний фиксирована. Такой источник называют монохроматическим. Нас будет интересовать главным образом сохранение пространственной когерентности при распространении света, поскольку каких-либо изменений частоты в сопровождающих распространение рассмотренных процессах не наблюдается.

Здесь удобно ввести понятие волнового фронта. Бросая, например, в воду камень и видя расходящиеся волны, мы говорим о том, что волновой фронт распространяется по воде, имея форму окружности. При этом именно на окружности с центром в точке падения камня колебания всегда приходят с одинаковой фазой, т. е. они синфазны. В оптике волновым фронтом называют гипотетическую поверхность, в которой выполняется условие постоянства фазы колебаний $S(\rho) = \text{const}$. Направление распространения волн характеризуют лучи, нормальные к данной поверхности.

Наглядно изображения волнового фронта для различных ситуаций представлены на рис. 1. На рис. 1, а изображен сферический волновой фронт точечного источника света, а на рис. 1, б — плоский волновой фронт. Наличие на пути плоского волнового фронта неоднородностей показателя преломления искажает фронт, как показано на рис. 1, в. Понятие волнового фронта позволяет легко проиллюстрировать описанные ранее трудности работы с искаженным излучением. Из рис. 1, г, д видно, что, в отличие от плоского (г), искаженный (д) волновой фронт не фокусируется в точку.

Итак, волновой фронт при наличии фазовых возмущений слу-

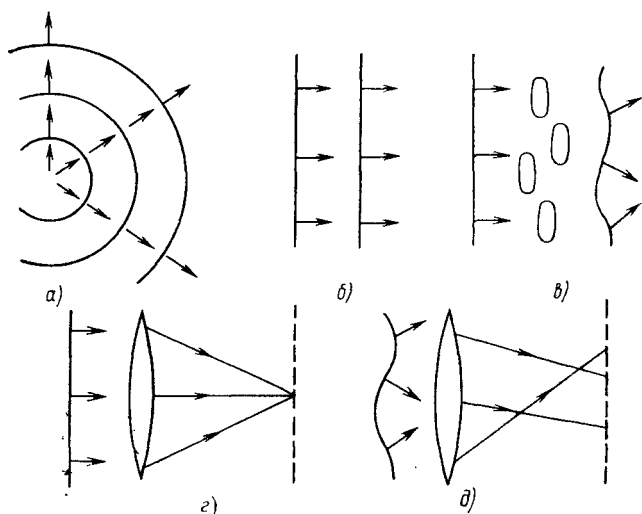


Рис. 1. Искажения волнового фронта и их последствия

чайным образом искривляется, причем если неоднородности показателя преломления меняются независимо, то и различные участки волнового фронта также искривляются независимо друг от друга. Таким образом, фаза в поперечном сечении в разных точках принимает независимые значения — происходит, как говорят, потеря когерентности излучения. Когерентными остаются лишь небольшие участки — «пятна», размер которых сравним с размером неоднородностей среды. Поэтому атмосферные трассы часто характеризуют радиусом когерентности атмосферы, который представляет собой характерный размер «пятна» когерентности.

Остановиваясь на терминологии, отметим, что зависимость или независимость различных участков искажений волнового фронта во многих случаях математически описывается соответствующей корреляционной функцией, например при описании ошибок изготовления оптических элементов приборов. Независимые или некоррелированные соседние участки имеют размер, который характеризуют радиусом корреляции искажений. Строго говоря, введенные здесь понятия линейных размеров искажений неэквивалентны, однако важно отметить их общность, поскольку они отражают величину масштаба неоднородностей.

Представленная качественная картина искажений излучения позволяет сделать следующий вывод. Для компенсации фазовых возмущений необходимо управлять фазой на множестве участков в сечении пучка, причем число элементов управления должно быть не меньше, чем число «пятен» когерентности, укладывающихся на площади сечения.

Обратимся теперь к количественным оценкам. Рассмотрим наиболее интересный вопрос компенсации атмосферной турбулентности.

Расчетно-теоретическими и экспериментальными методами показано, что радиус когерентности атмосферы определяется длиной волны излучения, длиной трассы, состоянием атмосферы, зенитным углом наблюдения. Так, например, при наблюдении объекта (звезды) или передаче света через толщу земной атмосферы типичное значение радиуса когерентности с учетом убывания C_n^2 по высоте оценивается (в метрах) по формуле

$$r_0 = 4,1 \left(\frac{\lambda}{1,06 \cdot 10^{-5}} \right)^{6/5} \cos^{3/5} \Theta,$$

где Θ — зенитный угол, рад; λ — длина волны, м.

Таковыми типичными значениями являются 5...10 см для видимого диапазона, 0,5...1 м для ИК-диапазона. При больших сечениях пучка, т. е. больших размерах приемных или передающих апертур телескопов, число «пятен» когерентности будет весьма внушительным — до сотни.

Оценим теперь, насколько сильно может колебаться фаза на каждом участке относительно среднего значения. Оказывается, что эти колебания зависят от тех же физических величин, что и радиус когерентности. Приближенно среднеквадратичное отклонение фазы в радианах можно выразить формулой Д. Фрида

$$\sigma_s = \sqrt{1,013(D/r_0)^{5/3}},$$

где D — диаметр апертуры.

Колебания фазы могут составлять по амплитуде более 2π рад, т. е. оптический путь отдельного луча увеличивается более чем на длину волны, а в некоторых случаях и на несколько длин волн.

Заметим, что колебания оптического пути в атмосфере в первом приближении не зависят от длины световой волны. Этот очень важный вывод позволяет, изменяя длину оптического пути, осуществлять компенсацию возмущений для некогерентных источников, например звезд.

Как уже говорилось, если сложить в фокусе все лучи, прошедшие через участки неоднородностей, то они будут складываться, имея различные фазы, в том числе и противоположные. Поэтому интенсивность в фокусе всегда будет ниже, чем для пучка, прошедшего без искажений. Среднее значение интенсивности в фокусе

будет составлять приблизительно $e^{(-\sigma_s^2)}$ от интенсивности, которая получилась бы при фокусировке пучка без искажений. Величина σ_s^2 называется дисперсией фазовых флуктуаций. В реальных случаях средняя интенсивность может быть в десятки и сотни раз меньше интенсивности без искажений.

Поскольку фазовые соотношения все время меняются, наблюдаются флуктуации интенсивности — мерцания. Так, Фауст и Маргарита, глядя на «звезд мерцающее пламя», на самом деле наблюдали результат фазовых возмущений в турбулентной атмосфере.

Выясним, насколько быстро меняются фазовые возмущения. Для этого воспользуемся известной моделью «замороженной»

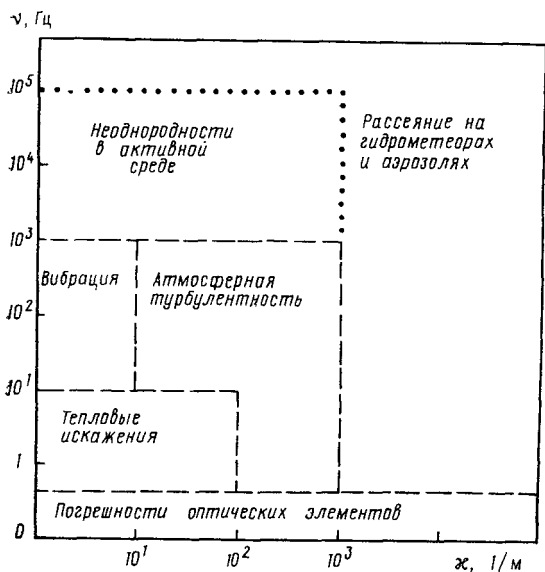


Рис. 2. Распределение искажений по пространственно-временным частотам (пунктиром отмечены ожидаемые значения частот)

возмущений описывается с помощью простых преобразований координат $S(\mathbf{p}) \rightarrow S(\mathbf{p} - \mathbf{v}t)$, где t — время.

Как показывает более строгий анализ, граничная частота возмущений зависит от параметров атмосферной трассы и убывает с ростом длины волны излучения. Характерные значения этой частоты распространяются от нескольких герц до нескольких десятков (реже — до сотен) герц.

Итак, мы получили некоторые количественные оценки для решения задачи компенсации атмосферной турбулентности. Аналогично можно оценить параметры других возможных источников искажений светового поля. Наглядно эти параметры представлены на рис. 2.

Таким образом, мы имеем основные требования к исполнительному элементу, который должен скомпенсировать нам фазовые возмущения. Грубо, этот исполнительный элемент должен с частотой в десятки герц изменять длину оптического пути на несколько длин волн для каждого из большого числа (до сотни) участков сечения пучка. Это можно сделать несколькими способами. Один из самых простых (идейно) способов — создание зеркала в виде мозаики из малых зеркальных секций, каждая из которых может перемещаться перпендикулярно отражающей поверхности. Перемещения можно осуществлять с помощью очень точных и быстродействующих приводов, например пьезоэлементов, изменяющих свою длину в зависимости от величины и знака приложенного

турбулентности. Заметим, что причиной возникновения турбулентности является движение воздушного потока — ветер, конвекция. Предположим, что неоднородности показателя преломления сами по себе неизменны — «вморожены» в движущуюся среду, а изменение неоднородностей является следствием их движения поперек пучка со скоростью воздушного потока. Поэтому в рамках модели «замороженной» турбулентности скорость изменения возмущений, по существу, определяется скоростью поперечного ветра, а временная зависимость фазовых

электрического напряжения. Для измерений искажений волнового фронта можно использовать, например, интерферометр, т. е. оптический прибор, образующий интерференционную картину, содержащую информацию о фазе анализируемого пучка. Кроме того, необходимо предусмотреть быструю регистрацию интерференционной картины, обработку информации на ЭВМ и выдачу необходимого управляющего сигнала на приводы секций зеркала. Весь этот акт должен быть совершен в реальном масштабе времени, т. е. быстрее, чем произойдет изменение фазы. При компенсации атмосферной турбулентности, в частности, для видимого диапазона — в течение нескольких миллисекунд.

Таковы вкратце постановка задачи компенсации фазовых возмущений и схема ее решения. Обратимся к развитию идей адаптивной оптики.

В.2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

Корни адаптивной оптики уходят в глубокую древность. Эмпирическое познание основных законов оптики (прямолинейное распространение света, отражение, преломление и т. п.) позволило Архимеду в 211 г. до н.э., создавшему гигантское секционированное зеркало, каждая секция которого управлялась человеком, и сосредоточившему солнечные лучи в одном месте, сжечь триеры неприятельского флота во время осады Сиракуз. Многие считают это легендой, однако в 1973 г. греческому инженеру Иоанису Саккасу удалось «повторить» опыт Архимеда. С помощью 60 человек, имевших зеркала размером 91×51 см каждое, И. Саккас поджег лодку, находящуюся на расстоянии 50 м и нагруженную смолой.

Несмотря на глубокие корни, адаптивная оптика — современное научное направление, сформировавшееся в последнее десятилетие и являющееся закономерным продолжением развития оптики. Вряд ли следует рассматривать адаптивную оптику только как инструмент для решения конкретной технической задачи. Возможность преодоления казавшихся ранее непреодолимыми физических препятствий позволяет, образно говоря, назвать адаптивную оптику «третьей молодостью» оптики, если считать «первой молодостью» создание физических основ современной оптики и оптических явлений (XIX в.), а второй — создание когерентных источников света (50—60-е гг. XX в.). И хотя идея компенсации фазовых возмущений при формировании оптических изображений была высказана в начале 50-х гг., разработка адаптивных оптических систем явилась следствием прежде всего возмужания «второй молодости» оптики.

К созданию адаптивных оптических систем научно-техническая мысль двигалась по нескольким направлениям, которые соединились в одно новое.

Так, необходимо упомянуть оптически низкокачественные световые коллекторы, используемые, например, в солнечных энергетических установках (это, как правило, огромные сложные сооружения, состоящие из большого числа зеркал — гелиостатов, направляющих солнечные лучи на теплоприемник). Нельзя не отметить появление составных оптических телескопов, позволивших увеличить эквивалентную площадь главного зеркала телескопа. Большое влияние на развитие адаптивной оптики оказали идеи В. П. Линника и Г. У. Бэбкока по компенсации атмосферных искажений при наблюдении звезд с помощью зеркальных устройств с составной или сплошной деформируемой поверхностью. Значительный вклад внесли принципы построения передающих адаптивных антенн в микроволновой радиотехнике.

На базе перечисленных самостоятельных направлений сформировалась концепция создания адаптивных оптических систем с адаптивным зеркалом в качестве исполнительного элемента. Это произошло в середине 70-х гг. XX в. с появлением первых быстродействующих оптических зеркал с изменяемой геометрией поверхности. Эта концепция, по существу, воплощена и в системах с исполнительными элементами не отражательного, а проходного типа (акустические решетки, управляемые транспаранты и т. п.).

Середина 70-х гг. XX в. отмечена развитием еще одного направления — обращения волнового фронта (ОВФ), обладающего самостоятельной концепцией управления фазой оптического излучения. Обращение волнового фронта, основанное на нелинейных эффектах воздействия света на вещество, имеет столь специфические физические особенности, что часто, когда идет речь о первой упомянутой концепции, говорят об адаптивной оптике, а когда о второй — об ОВФ. Изящная идея ОВФ оказалась столь плодотворной для компенсации искажений оптических пучков, что изложение адаптивной оптики без ОВФ было бы неполным. Обсуждать же вопрос о конкуренции или предпочтении той или иной концепции адаптивной компенсации искажений, по-видимому, имеет смысл в той же мере, в какой можно сравнивать, например, железнодорожный и воздушный транспорт.

Обратимся к основным вехам развития адаптивной оптики. С момента появления идей Линника — Бэбкока прошло около четверти века, прежде чем они нашли свое частичное воплощение в конкретных технических устройствах. Основной причиной этого было отсутствие необходимых исполнительных элементов. Мощным толчком развития данного направления стало совершенствование когерентных источников света.

Следует отметить небольшую экспериментальную работу У. Катей (1968 г.), оказавшую влияние на развитие обеих концепций адаптивной компенсации. В статическом режиме с помощью голограммы У. Катей продемонстрировал почти идеальную фокусировку света через сильно искажающую прозрачную пластину.

К середине 70-х гг. была практически проверена и доказана состоятельность основных принципов работы адаптивных оптических

систем для формирования уходящей к объекту подсвета волны [4] (в то время такие системы получили название когерентной оптической адаптивной техники (КОАТ)). К концу 70-х — началу 80-х гг. окончательно сложились принципы построения исполнительных элементов — быстродействующих высокоточных адаптивных зеркал. В 1976—1977 гг. впервые была осуществлена компенсация атмосферной турбулентности и получено улучшенное изображение звезд (разработки соответственно Калифорнийского университета и фирмы Itek Corporation, США).

Эффект ОВФ в реальном масштабе времени впервые был обнаружен в 1972 г. (Б. Я. Зельдович, О. Ю. Носач, В. И. Поповичев, В. В. Рагульский, Ф. С. Файзуллов). В основе физического механизма обращения лежал эффект вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна. В 1977—1978 гг. была показана возможность получения ОВФ с использованием вынужденного комбинационного рассеяния и суперлюминесценции.

На возможность реализации ОВФ голографическими методами указывалось еще в начале 60-х гг. в работах Ю. Денисюка и Г. Когельника. Однако голографическая «ветвь» ОВФ фактически была найдена в 1977 г.

В работе Р. Хеллварса предлагалось использование четырехволнового смешения для получения обращенной волны, а в работе А. Ярива — использование трехволнового смешения.

В начале 1980 г. на конференции в Ленинграде было доложено о возможности обращения световой волны поверхностью, обладающей нелинейными свойствами; к 1982 г. было обнаружено ОВФ в стеклянных волоконных световодах и т. д.

Таким образом, развитие обеих концепций адаптивной компенсации искажений светового поля происходило синхронно [5—8]. Подтверждением этого факта явилось одновременное появление в 1985 г. двух книг, посвященных основам соответствующих концепций [2, 3].

Глава 1.

АДАПТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

1.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Вполне естественно, что реализация адаптивных оптических систем определяется конкретным, решаемым ею кругом задач. Однако это не мешает изложить общие принципы построения таких систем. Различают системы с выходящей волной, когда корректируется волновой фронт источника света, и системы с принимаемой волной, когда корректируется световое поле, приходящее от наблюдаемого объекта. В свою очередь, и те и другие могут быть реализованы на принципах фазового сопряжения и апертурного зондирования (рис. 3).

Для понимания процессов фазового сопряжения и апертурного зондирования рассмотрим освещение объекта через турбулентную атмосферу источником монохроматического излучения (см. рис. 3, а).

В системе фазового сопряжения пучок света отражается от малого участка объекта (цели), образуя сферическую волну, которая проходит обратно по пути распространения света и претерпевает те же самые искажения, что и излученная волна (в силу принципа оптической обратимости). Пришедшая отраженная волна попадает в датчик волнового фронта, где и выявляются искажения на трассе. Устройство обработки данных производит расчет необходимой коррекции волнового фронта, которая осуществляется устройством воздействия на волновой фронт. Внесенное в результате коррекции в волновой фронт предискажение компенсируется на трассе, и свет концентрируется на отражающем участке цели (см. рис. 3, в). Математически это выглядит так: приходит искаженный трассой сигнал e^{iS} (берем только фазовый множитель сигнала); определяем S и отправляем к цели предискаженный сопряженный сигнал e^{-iS} , который искажается трассой и в результате искажения компенсируется ($e^{-iS}e^{iS}=1$). Математический комментарий делает понятным этимологию термина «фазовое сопряжение».

Принцип апертурного зондирования основан на возможности внесения в волновой фронт пробных возмущений, которые трансформируются в амплитудные возмущения сигнала. Так, анализируя изменения интенсивности света, отраженного от цели, делают вывод о знаке изменения фазы и деформируют волновой фронт до тех пор, пока не будет оптимизирована фокусировка на объекте.

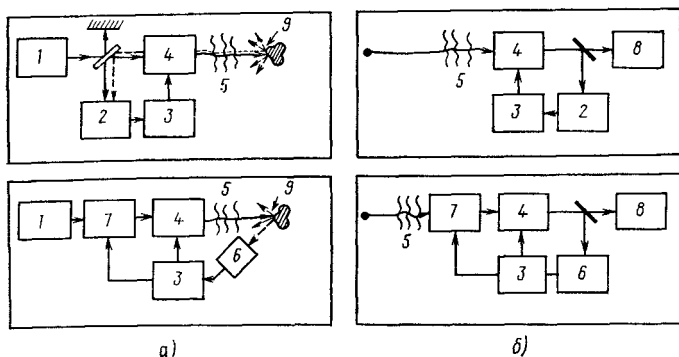
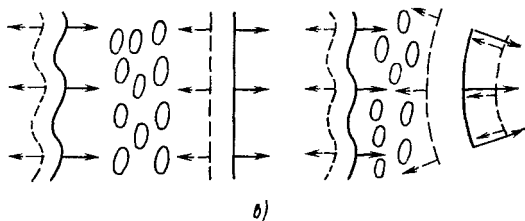


Рис. 3. Адаптивные оптические системы:

а, б — с выходящей и принимаемой волной соответственно, реализующие принцип фазового сопряжения (верхний рисунок) и апертурного зондирования (нижний рисунок); в — результат коррекции искажений плоского и сферического волнового фронта (ВФ) для систем с выходящей волной; 1 — источник света; 2 — датчик ВФ; 3 — устройство обработки данных; 4 — устройство воздействия на ВФ; 5 — возмущения ВФ; 6 — приемник интенсивности; 7 — система апертурного зондирования; 8 — приемник изображения; 9 — цель



Пробные возмущения могут вноситься последовательно, например, для каждого участка коррекции волнового фронта и параллельно для всех участков сразу. При этом применяется «окрашивание» каждого из каналов управления определенной частотой пробных возмущений.

Во многих случаях результатом действия систем апертурного зондирования является формирование фазосопреженного сигнала e^{-is} , уходящего к цели. Поэтому в системах апертурного зондирования осуществляется как бы косвенное измерение фазы.

Аналогичным образом работают системы с принимаемой волной. В системах фазового сопряжения часть принятого света с искаженным волновым фронтом направляется на датчик волнового фронта. Полученная информация используется для создания компенсирующего воздействия на принятый волновой фронт. В результате на приемнике в идеале формируется ограниченное лишь дифракцией изображение. В системах апертурного зондирования вносят пробные возмущения в принятый волновой фронт, а их влияние оценивают с помощью приемника, размещенного в плоскости изображения, используя какой-либо из критериев резкости изображения.

Как правило, адаптивная система состоит из тракта, в составе которого содержится оптическое приемное и (или) передающее устройство, а также воздействующий на волновой фронт активный элемент, датчика волнового фронта или приемника и системы обратной связи.

Приемная и передающая апертуры для излучающих систем могут быть разделены между собой, частично или полностью совмещены.

В качестве активных элементов чаще всего используются отражатели (рис. 4): секционированные зеркала, зеркала с непрерывной деформируемой поверхностью, многоэлементные оптические системы.

Деформируя зеркальную поверхность с помощью приводов, изменяют фазу (оптический путь) лучей, падающих на данный участок поверхности. Более сложные системы (см. рис. 4, б) обеспечивают обработку каждым оптическим элементом определенного вида возмущений — наклонов по осям OX , OY , расфокусировки и т. д. Нескомпенсированные составляющие возмущений, имеющие нерегулярную структуру, в многоэлементных системах могут быть парированы деформируемым зеркалом.

Вопрос о датчике волнового фронта вызывает наибольший интерес при знакомстве с адаптивной оптикой, так как не сразу можно себе представить проведение измерений распределения оптической фазы по сечению пучка в реальном масштабе времени.

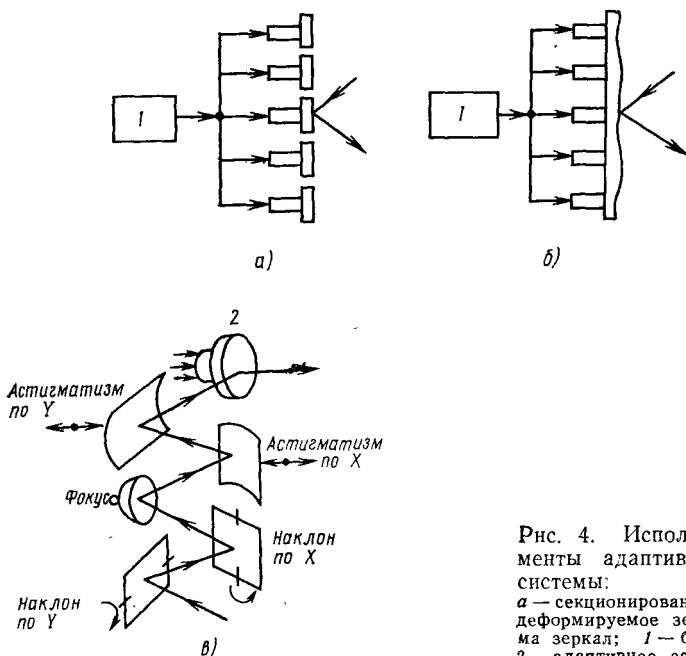


Рис. 4. Исполнительные элементы адаптивной оптической системы:
а — секционированное зеркало; б — деформируемое зеркало; 1 — блоки управления; 2 — адаптивное зеркало

Таблица 1. Применяемые в адаптивной оптике критерии и показатели качества

Наименование	Математическое выражение	Физический смысл	Область применения
Среднеквадратичное отклонение волнового фронта	$\sigma^2 = \frac{1}{Q} \iint [S(\rho) - S'(\rho)]^2 d^2\rho \rightarrow \min$	Отклонение на апертуре площади Ω сформированного волнового фронта S от расчетного S'	Системы фазового сопряжения; математическое моделирование
Функционал фокусировки	$J_f = \iint M(\rho) A(\rho) ^2 d^2\rho \rightarrow \max$ (при $M = \delta(\mathbf{P})$ — нормированная осевая интенсивность, называемая числом Штреля)	Мощность оптического сигнала $A(\rho)$, попадающая в аперттуру $M(\rho)$.	Системы апертурного зондирования; фокусировка излучения; математическое моделирование
Эффективная ширина распределения интенсивности	$J_\omega = \iint \rho ^2 A(\rho) ^2 d^2\rho \rightarrow \min$	Ширина пучка, в котором содержится определенная доля излучения	Системы апертурного зондирования для формирования изображения; фокусировка излучения; математическое моделирование
Линейная комбинация функционала фокусировки и эффективной ширины пучка Функционал пространственного распределения интенсивности	$J_L = J_f - c J_\omega \rightarrow \max$ $J_p = \iint [I(\rho) - I'(\rho)]^p d^2\rho \rightarrow \min,$ $p = 2, 4, 6, \dots$	Фокусировка заданной доли излучения в минимальную площадь	Фокусировка излучения; математическое моделирование
Функционал резкости изображения	$J_d = \iint I^n(\rho) d^2\rho \rightarrow \max,$ $n \geq 2$	Отличие полученного изображения с распределением интенсивности $I(\rho)$ от известного идеального $I'(\rho)$	Системы апертурного зондирования для формирования изображения
Интерференционный критерий	$J_u = \iint A(\rho) \psi(\rho) d^2\rho = \text{const}$	Улучшение условий наблюдения при формировании изображения	Системы апертурного зондирования для формирования изображения точечных объектов
Статистические критерии	$\langle J_u \rangle;$ $k_S = \langle J_u J_u^* \rangle$	Перекрытие излученной $A(\rho)$ и отраженной $\psi(\rho)$ волн	Системы фазового сопряжения
		Среднее значение интерференционно-го критерия (квadrата модуля) по ансамблю шероховатостей	При облучении шероховатых поверхностей

Первый путь для осуществления таких измерений лежит в прямых гетеродинных измерениях фазы. Метод достаточно широко известен из СВЧ-техники и описан в [9].

Второй путь связан с непосредственным измерением разности фаз на различных участках сечения пучка интерферометрическими методами (например, с помощью интерферометра радиального сдвига) или методом Гартмана. Последний метод позволяет измерить с помощью матрицы приемников локальные наклоны волнового фронта, из которых можно восстановить, используя электронно-вычислительные средства, общий волновой фронт.

И наконец, третий путь связан с косвенными измерениями, которые реализуются в системах апертурного зондирования для достижения заданного критерия адаптации.

Критерии или показатели качества системы в адаптивной оптике обычно связывают с концентрацией света на объекте или приемнике. Основные требования к ним заключаются в возможности их измерений, простоте и удобстве работы с ними в зависимости от назначения системы. В адаптивной оптике принято использовать следующие критерии и показатели качества (табл. 1).

Системы обратной связи выполняются на основе стандартных или специальных электронных средств в аналоговом и (или) цифровом вариантах, реализующих принятый алгоритм управления.

Различают два подхода к управлению волновым фронтом. В случае, когда возмущения детерминированы, можно применить программное управление. Этот же подход годится при коррекции средних характеристик случайных возмущений. Развитие систем с программным управлением может привести к созданию адаптивных систем управления с самообучением. Второй подход, который нами собственно и рассматривается, основывается на измерении и компенсации мгновенного случайного возмущения.

1.2. СИСТЕМЫ ФАЗОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ

Идейно системы фазового сопряжения проще систем апертурного зондирования. Однако по числу реализованных систем первые уступают вторым. Это объясняется тем, что в системах фазового сопряжения используется датчик волнового фронта, по сложности сравнимый с исполнительным элементом — адаптивным зеркалом, в общем случае — высокопроизводительная (примерно 10^7 операций в секунду) электронно-вычислительная техника.

В ранней работе К. Хейеса и др. описаны наиболее простая схема (рис. 5) и результаты экспериментального исследования фазосопряженной системы. В экспериментах используется 40-ваттный одномодовый генератор на углекислом газе, луч которого с помощью светоделителей из NaCl разделяется на семь лучей. Лучи проходят через фазовращатели на брэгговских ячейках из германия и направляются на неподвижные зеркала, формирующие диаграмму направленности излучения. Брэгговские ячейки представляют собой акустооптические модуляторы, которые произво-

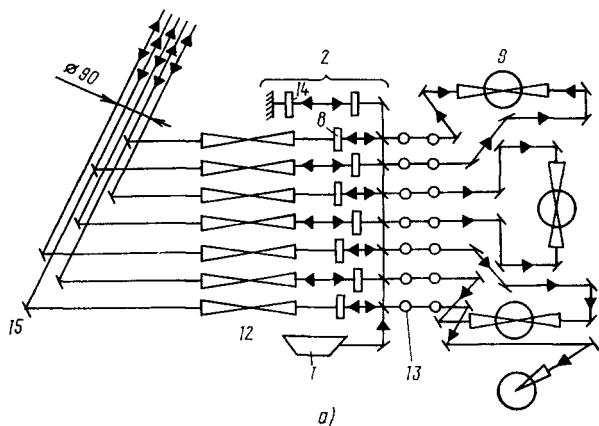
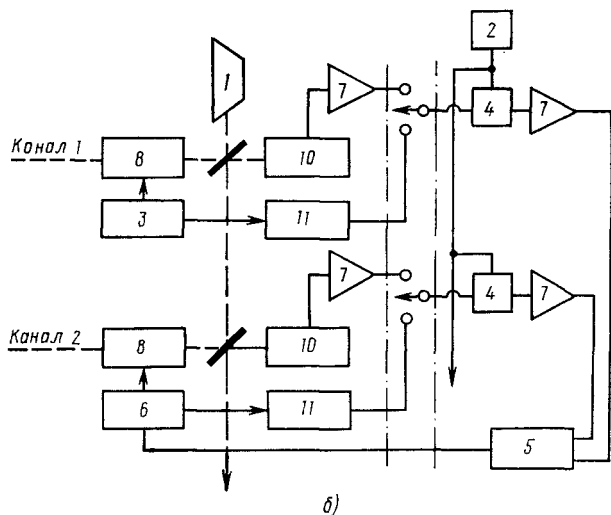


Рис. 5. Оптическая (а) и электрическая (б) схемы семиэлементной системы фазового сопряжения:

1 — генератор; 2 — гетеродин (5 МГц); 3 — генератор опорного сигнала (18 МГц); 4 — смеситель (5 МГц—4,5 МГц=0,5 МГц); 5 — фазовый детектор; 6 — генератор управляющего напряжения; 7 — усилитель промежуточной частоты; 8 — ячейка Брэгга; 9 — приемное устройство; 10 — детектор; 11 — удвоитель; 12 — расширитель пучка; 13 — защитные поляроиды; 14 — четвертьволновая пластинка; 15 — зеркала



дят сдвиг фазы проходящего через них оптического излучения при изменении мгновенной частоты акустической волны. Фазовращатели работают на акустических частотах около 18 МГц. При этом сдвиг фазы может достигать очень больших значений (100π за время 10^{-3} с).

В передающем канале каждого луча установлена четвертьволновая пластинка из сульфида кадмия. В результате отраженная от точечного объекта волна при обратном проходе через пластинку имеет поляризацию, отличающуюся на 90° от поляризации излученной волны. В каждом приемном канале установлены под углом Брюстера две германиевые пластинки, которые позволяют устранить рассеянное паразитное излучение.

Для измерения фазы прошедшей назад волны используется гетеродинное детектирование. В общей для всех каналов ветви гетеродина также установлены ячейка Брэгга, возбуждаемая частотой

той 15,75 МГц, четвертьволновая пластинка и зеркало. После двукратного прохождения пучков через приемно-передающий и гетеродинный тракты, сдвинутые по частоте на 4,5 МГц, волны интерферируют между собой в плоскости детектора $Pb_xSn_{1-x}Te$. Детектор преобразует оптический сигнал в электрический с частотой 4,5 МГц. Этот сигнал смешивается в электронной схеме управления с опорным сигналом на частоте 5 МГц, в результате чего возникает сигнал на частоте 0,5 МГц, который далее поступает на синхронный фазовый детектор.

На фазовый детектор поступает также электрический сигнал с опорного канала. Фазовое рассогласование с опорным сигналом служит для управления генератором сигналов, связанным с брегговской ячейкой. Таким образом, в уходящий луч вносится сдвиг фазы, или, иными словами, осуществляется оптическое фазовое согласование с опорным каналом.

Описанная схема испытана на атмосферных трассах 1,6 и 9,5 км. В качестве имитатора цели использовался угольный отражатель размером около 1 см. Эксперименты проводились при размещении передающих зеркал диаметром 2,5 см в линейку на расстояниях 3 и 9,5 см между центрами и по кругу с одним центральным зеркалом на расстоянии 3,25 см между центрами зеркал. Во всех случаях наблюдалась устойчивая адаптация, сопровождающаяся значительным повышением мощности сигнала на имитаторе цели. В полосе частот до 2 кГц наблюдалась практически полная компенсация флуктуаций интенсивности на цели. При сильной турбулентности $C_n^2 \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ для трассы длиной в километр дисперсия осцилляций интенсивности уменьшалась в 23 раза. В эксперименте были продемонстрированы поиск и автоматическое сопровождение движущегося имитатора цели. Эффект поиска, захвата и сопровождения в небольшом угловом поле является естественным свойством адаптивных систем — в данном случае происходит компенсация возмущений в виде случайных наклонов волнового фронта.

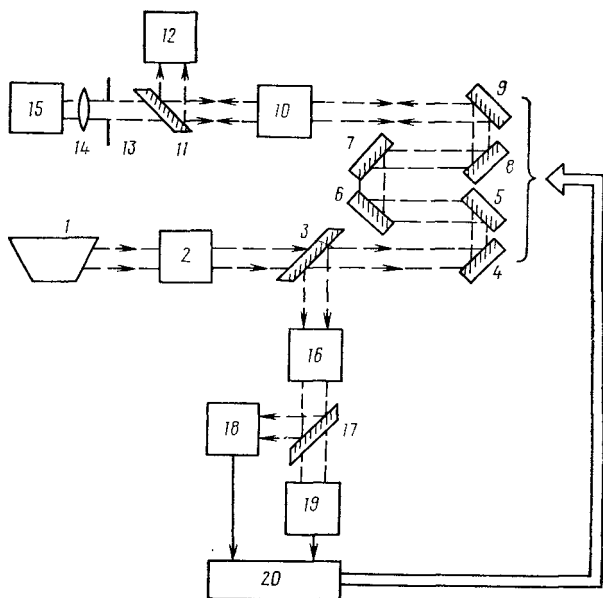
Другая схема фазосопряженной системы, которая была исследована экспериментально [10], приведена на рис. 6.

Пучок генератора на гелий-неоне, расширенный до диаметра 65 мм, последовательно засвечивает управляемые зеркала 4—9. Зеркала 4 и 5 изменяют общий наклон волнового фронта по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Каждое из зеркал 6—9 состоит из трех круглых секций, причем секции зеркал 6 и 7 имеют возможность для наклона, а зеркало 9, перемещаясь, компенсирует относительные сдвиги отдельных пучков. Зеркало 8 служит для начальной юстировки системы. Движение зеркал осуществляется с помощью пьезоэлементов, изменяющих свою длину в зависимости от значения и знака приложенного напряжения.

Весь пучок далее направляется через имитатор турбулентной среды (для имитации можно воспользоваться нагревательным элементом, создающим конвективные воздушные потоки) на микродиафрагму, за которой устанавливается либо зеркало, возвраща-

Рис. 6. Блок-схема экспериментальной системы фазового сопряжения:

1, 15 — генераторы; 2, 16 — телескопы; 3, 11, 17 — светоделители; 4—9 — управляемые зеркала; 10 — имитатор турбулентности; 12 — система контроля; 13 — микродиафрагма; 14 — объектив; 18 — интерферометр; 19 — анализатор изображения; 20 — устройство управления



ющее излучение, либо маломощный источник света для имитации самосветящегося объекта.

Наиболее интересным устройством является узел контроля волнового фронта, состоящий из двух датчиков: датчика для контроля наклонов с использованием сканирующего щелевого анализатора изображений и датчика контроля относительной задержки в отдельных пучках с применением интерферометра.

В щелевом анализаторе осуществляется сканирование с частотой 8,3 кГц полученного изображения относительно двух взаимно перпендикулярных щелей, а регистрация оптического сигнала производится блоками приемников — фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), которые расположены в плоскости изображения соответствующих секций зеркал 6—9. Сигнал на каждом ФЭУ пропорционален смещению относительно щели изображения объекта, сформированного секцией зеркала.

В интерферометре опорный пучок от центральной секции зеркала 9 складывается с излучением от крайних секций. Опорный пучок модулирован по фазе с частотой 13 кГц малым колебательным перемещением зеркала с помощью пьезоэлемента. Поэтому многоэлементный блок ФЭУ, на который проецируется интерференционная картина, детектирует переменный сигнал, поступающий в устройство управления. Коррекция положения секций (наклон и поступательное перемещение) производится в каналах параллельно. В экспериментах получено примерно пятикратное увеличение интенсивности света в точке фокусировки пучка.

Мы рассмотрели сравнительно простые схемы систем фазового сопряжения, которые убеждают в возможности компенсации фазо-

вых возмущений в реальном масштабе времени. Более сложные системы построены по тем же принципам, т. е. они содержат основные составляющие: адаптивное зеркало (или иной эквивалентный исполнительный элемент), датчик волнового фронта, процессор.

Однако каждое из этих устройств может быть куда более сложным и функционально развитым, чем те, которые представлены в описанных схемах. Детальному анализу устройств, разрабатываемых в интересах адаптивной оптики, и их функционированию посвящены гл. 2—4.

В заключение раздела приведем еще одну схему, на которой нельзя не остановиться ввиду ее перспективности и принципиального отличия от уже известных нам общих схем. Речь идет о фазированной решетке генераторов. Простая схема такой пятиканальной решетки предложена К. Хейесом и В. Дэвисом. Адаптивная система состоит из пяти генераторов на углекислом газе, объединенных двумя цепями управления. Первая цепь обеспечивает фазовую синхронизацию отдельных генераторов. При этом для подстройки резонатора применяется перемещение одного из зеркал с помощью пьезоэлемента, а модуляция фазы осуществляется установлением внутри резонатора электрооптического фазового модулятора. Второй контур управления служит для коррекции волнового фронта, уходящего к цели. При этом возвращенные волны складываются с общей опорной волной, после чего процессор определяет сигнал фазовой коррекции. Положительные стороны этой схемы очевидны: для получения необходимой мощности выходного сигнала используются сравнительно недорогие, надежные, маломощные генераторы с излучением высокого качества (монокроматичность, поляризация и т. д.); на оптику каждого канала накладываются более мягкие требования; для создания систем можно применять модульный принцип построения; расширяются возможности системы и т. д. Однако сложность технической реализации решеток останавливает многих исследователей и инженеров, поэтому в настоящее время фазированные решетки генераторов не получили достаточного распространения в адаптивной оптике.

Адаптивные оптические системы могут работать не только при обязательном наличии цели. На рис. 7 изображена система, компенсирующая возмущения выходного излучения генератора или возмущения, вносимые элементами оптической системы, через ко-

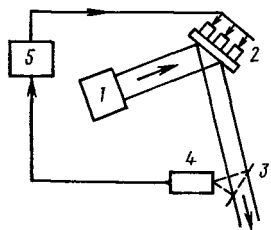


Рис. 7. Схема локально-замкнутой системы фазового сопряжения с деформируемым адаптивным зеркалом: 1 — генератор излучения; 2 — адаптивное зеркало; 3 — ответвитель излучения; 4 — датчик волнового фронта; 5 — ЭВМ

торую проходит излучение. В этом случае рабочий пучок, выходящий из адаптивной системы, оказывается полностью или частично «очищенным» от возмущений. Такие системы можно назвать локально-замкнутыми или системами внутренней коррекции, в отличие от систем внешней коррекции, замыкание которых производится через цель. Видно, что для локально-замкнутых систем необходим ответитель излучения.

1.3. СИСТЕМЫ АПЕРТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для того чтобы понять, как можно добиться максимизации световой интенсивности в заданной точке с помощью изменения фазовых соотношений между лучами, рассмотрим простейший пример одноканальной системы апертурного зондирования (рис. 8). Излучающая апертура составлена из двух зеркал: подвижного и неподвижного. В результате интерференции на отражающей малой цели образуется интерференционная картина в виде светлых и темных полос или концентрических окружностей (при интерференции сферических волн). Наша задача при любых возмущениях — движении цели, изменении длины оптических путей — удерживать на цели светлую полосу. В автоматическом режиме это делается так. С помощью генератора синусоидальных колебаний зеркало 3 совершает колебания с малой амплитудой и большой частотой. Интерференционная картина на цели также немного смещается то в одну, то в другую сторону с той же самой частотой. Таким образом происходят малые колебания интенсивности света на цели, что и фиксируется фотоприемником 5. Фотоприемник преобразует колебания интенсивности в электрические колебания, которые направляются на синхронный детектор. В синхронном детекторе производится умножение принятого сигнала и сигнала генератора синусоидальных колебаний с последующим выделением с помощью фильтра низких частот низкочастотной составляющей. Так как оба сигнала имеют одинаковую несущую частоту, то в результате выделяется фазовый сдвиг между колебаниями. Иными словами, оказывается сформированным рабочий сигнал для управления подвижным зеркалом. При небольших возмущениях рабочий сигнал

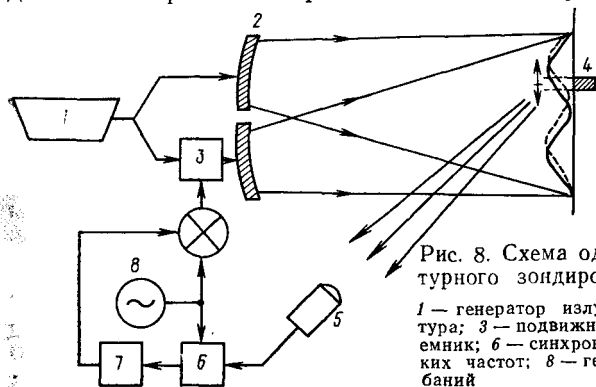


Рис. 8. Схема одноканальной системы апертурного зондирования:

1 — генератор излучения; 2 — передающая апертура; 3 — подвижное зеркало; 4 — цель; 5 — приемник; 6 — синхронный детектор; 7 — фильтр низких частот; 8 — генератор синусоидальных колебаний

будет равен фазовому сдвигу между интерферирующими пучками и противоположен ему по знаку, что и обеспечивает компенсацию возмущений. Если возмущения значительны, то движение зеркала z будет продолжаться до тех пор, пока будет оставаться фазовое рассогласование и система не достигнет экстремальной интенсивности на цели (светлой полосы). В теории автоматического управления системы такого рода называются экстремальными системами с модулирующим воздействием. В данном случае модулируется фаза оптического сигнала. Однако в адаптивной оптике они известны как системы апертурного зондирования, поскольку создание поискового модулирующего сигнала «поручено» апертуре.

Принципиальным в описанной системе является следующее условие: частота колебаний (модуляции) должна существенно превосходить характерную частоту компенсируемых возмущений. В случае многоканальной системы, когда апертура представляет собой мозаику из перемещаемых зеркал, необходимо знать, на какое зеркало направить выделенный рабочий сигнал фазового сдвига. Конечно, можно было бы последовательно подавать сигнал модуляции на каждое зеркало, что, естественно, затягивает время адаптации. Поэтому чаще осуществляют параллельную обработку сигналов, модулируя фазу для каждого канала своей собственной частотой. Такое «окрашивание» каждого канала позволяет, получая на фотоприемнике сигнал, содержащий весь спектр частот модуляции, выделить с помощью синхронных детекторов и фильтров в каждом канале только свой рабочий сигнал. Данный принцип построения систем лег в основу их раннего названия — системы с многоканальной фазовой модуляцией.

Частоты модуляции для N каналов $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_N$ должны удовлетворять следующим требованиям: $\nu_1 \geq 10\Delta\nu$; $\nu_{n+1} - \nu_n > \Delta\nu$, где $\Delta\nu$ — ширина полосы пропускания частот коррекции разомкнутой системы; $\nu_n \pm \nu_m \neq \nu_i$; $\nu_n \neq p\nu_i$, где $i, n, m = 1, \dots, N$; p — натуральное число.

Синусоидальные колебания с такими частотами относятся к взаимно ортогональным функциям, т. е. их среднее произведение за определенный период времени равно нулю. Аналогичным свойством обладают функции синус и косинус, имеющие одинаковую частоту колебаний. Это свойство позволяет использовать для модуляции вдвое меньше частот, организуя синус-косинусную модуляцию двух каналов на одинаковой частоте.

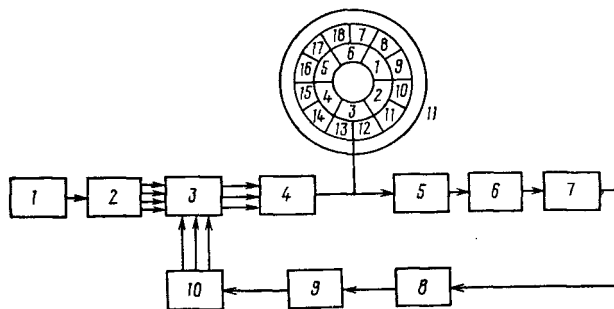
Системы апертурного зондирования, как правило, подвергаются тщательному анализу на устойчивость, которая требует определенных ограничений при выборе параметров элементов систем.

Примером технической реализации многоканальной системы апертурного зондирования является 18-элементная система с секционированным адаптивным зеркалом (рис. 9).

Излучение генератора на аргоне с помощью светоделиителя распределяется между отражательными элементами матрицы, которые являются и модуляторами, и корректорами фазы для каждого из лучей. Затем все лучи сводятся в единый пучок и направляются

Рис. 9. Блок-схема 18-канальной системы апертурного зондирования с многоканальной фазовой модуляцией:

1 — генератор излучения; 2 — светоделитель; 3 — матрица зеркальных корректоров и модуляторов; 4 — устройство сведения пучка; 5 — поворотное зеркало; 6 — выходной телескоп; 7 — объект (цель); 8 — приемник излучения; 9 — формирователь сигнала; 10 — электронная система управления (блок синхронных детекторов); 11 — адаптивное зеркало из 18 элементов



к цели. Модуляция осуществляется колебаниями элементов с амплитудой 0,06λ на канальных частотах 8...32 кГц. Интервал между частотами в каналах составляет 1,4 и 2,8 кГц при синусокодирующей модуляции. Характерное время адаптации системы составляет 1,2...5 мс при коэффициенте усиления в системе соответственно 37...12 дБ, обнаруживая примерно обратную зависимость от коэффициента усиления.

Применение данной системы на горизонтальной турбулентной трассе длиной 100 м дает увеличение средней мощности сигнала в точке фокусировки более чем в 2,5 раза. Интенсивность света достигает 80% от интенсивности, которая имеет место в отсутствие турбулентных возмущений. Эмпирическая формула для ширины полосы пропускания частот, требуемой для эффективной работы данной системы, имеет вид $v_c = 0,69v/r_0$, где v — скорость поперечного ветра; r_0 — радиус когерентности атмосферы.

Система показывает сравнительно широкие возможности метода апертурного зондирования. Работа может производиться по блещущей цели, с инвертированием рабочего сигнала (по черной точке), по освещенному краю, сдвигающейся целью.

В дальнейшем в систе-

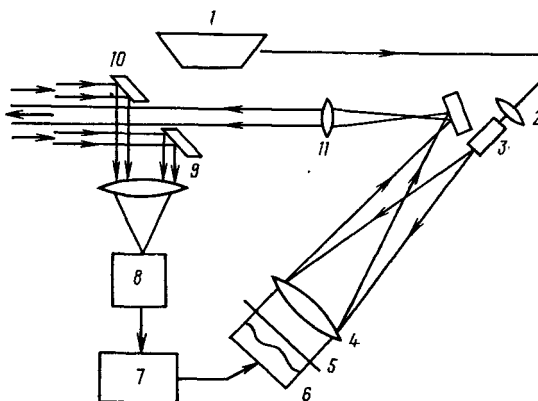


Рис. 10. Оптическая схема системы апертурного зондирования с деформируемым адаптивным зеркалом:

1 — генератор излучения; 2, 4, 9, 11 — собирающие линзы; 3 — пространственный фильтр; 5 — маска; 6 — адаптивное зеркало; 7 — блок управления; 8 — фотоэлектронный умножитель; 10 — кольцевое при-

мах апертурного зондирования стали использоваться зеркала с непрерывной деформируемой поверхностью. Подробно система с деформируемым зеркалом исследована на экспериментальной установке, изображенной на рис. 10 [4]. Система построена по образцу системы, представленной выше.

Зеркало выполняет функции корректора и модулятора одновременно. Частоты синус-косинусной модуляции лежат в диапазоне 4... 17,5 кГц. Характерное время адаптации составляет 1,5... 4 мс. При испытаниях на турбулентной трассе длиной 120 м наблюдается повышение средней интенсивности в точке фокусировки в 3 раза.

Применение зеркала с непрерывной поверхностью обнаруживает ряд особенностей системы апертурного зондирования. Они обусловлены заметным взаимным влиянием каналов из-за механического взаимодействия точек непрерывной поверхности при ее деформации. Так, деформация участка зеркала при подаче на него рабочего сигнала и модулирующей частоты вызывает частичную деформацию соседних участков — «вмешивается» в работу других каналов.

Указанное взаимное влияние можно характеризовать коэффициентом механической связи C_m , который при единичном перемещении привода выражает значение перемещений соседних приводов. С учетом взаимного влияния приходится шире разносить частоты модуляции, чтобы увеличить селективирующие свойства каналов. Верхняя граница спектра частот модуляции определяется из формулы

$$\nu_{\max} = [10 + C(N-1)]\Delta\nu,$$

где C — коэффициент, зависящий от коэффициента механической связи C_m модулятора и корректора. Коэффициент C принимает значения от 1,6 при секционированном зеркале до 5,3 при двух сплошных зеркалах коррекции и модуляции.

Разработка адаптивных оптических систем связана с преодолением ряда специфических трудностей, к описанию которых мы и переходим.

1.4. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В идеале системы апертурного зондирования и фазового сопряжения работают по точечной цели. Если мы способны сами устанавливать, относительно какой цели нам предстоит адаптироваться (контролируемая цель), то осуществить идеальный случай несложно. Например, в системах связи или передачи световой энергии на расстояние можно установить на цели специальный (например, уголкового) отражатель, который возвращает зеркально отраженное излучение обратно к приемному устройству адаптивной оптической системы. Однако в общем случае произвольной цели можно столкнуться с большими трудностями. Попробуем наглядно представить эти трудности и пути их преодоления.

Прежде всего остановимся на понятии точечной цели. Сфокусируем в плоскости цели излучение, выходящее из апертуры диаметром D . Пусть фокусное расстояние равно L . Тогда для невозмущенного излучения фокальное пятно из-за наличия дифракции будет иметь эффективный размер $2,44\lambda L/D$ (в нем содержится 84% энергии). Меньше данное пятно сделать нельзя. Точечной целью обычно называют цель, размер которой не превосходит $\lambda L/D$ (или угловой размер λ/D). Например, две примыкающие друг к другу цели размером $\lambda L/2D$ будут фактически полностью «накрыты» фокальным пятном, т. е. представлять собой одну точечную цель. В этом случае говорят, что цель не разрешается передающей апертурой. Таким образом, вопрос о том, с какой целью мы имеем дело — с точечной или протяженной, решается с учетом длины волны излучения, размера апертуры и расстояния до цели. Одна и та же движущаяся цель, очевидно, может быть как точечной, так и протяженной в зависимости от ее положения.

Рассмотрим цель, близкую по размеру к точечной. Если цель неподвижна относительно адаптивной системы, то система работает так, как описано ранее. Если же цель движется, то отраженные от отдельных геометрических точек цели лучи, интерферируя друг с другом, создают на приемнике мерцания, которые связаны с относительным изменением фазы лучей в результате движения цели. Для близко расположенных точек размер светлых и темных пятен, возникающих из-за интерференции, больше или сравним с размером апертуры приемника. Чередование пятен на приемной апертуре во время движения цели вызывает паразитную модуляцию амплитуды принимаемого сигнала. Частота этой модуляции зависит от скорости вращательного движения цели относительно центра передающей апертуры. Пятенная картина, видимая при отражении от предметов, называется спекл-структурой (от английского *to speckle* — испещрять), а модуляция, вызванная движением цели, — спекл-модуляцией. По мере увеличения расстояния между интерферирующими точками размер темных и светлых пятен уменьшается (характерный размер спеклов равен $\lambda L/a$, где a — размер освещенного пятна на цели). При малых размерах пятен по сравнению с размером приемной апертуры происходит усреднение амплитуды сигнала по апертуре. Иными словами, модуляция амплитуды здесь проявляется слабо. Поэтому для парирования модуляции стремятся увеличить размер приемной апертуры.

Описанное явление спекл-модуляции можно рассматривать как мультипликативный шум. При медленном вращении цели (менее $0,1 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$) частота модуляции невелика и отрабатывается автоматической регулировкой усиления. Более сложная ситуация возникает, когда шум занимает полосу частот многоканальной фазовой модуляции излучения. В этом случае шумовые составляющие проникают через синхронные детекторы соответствующих каналов и являются источниками ошибок фазирования. Это приводит к снижению интенсивности на цели, а в худшем варианте — к потере устойчивости адаптивной системы.

Одним из путей устранения мультипликативного шума на частотах фазовой модуляции является использование системы апертурного зондирования с делителем сигналов. Идея такого рода схем заключается в делении сигнала $M_S(t)I^*(t)$, несущего информацию ($M_S(t)$ — шумовая составляющая; $I^*(t)$ — полезный сигнал), на пробный сигнал с опорной частотой ω_a , который имеет вид $M_S(t)I_a^*(t)$, где $I_a^*(t)$ — составляющая интенсивности на частоте $2\omega_a$.

Для получения пробного сигнала, который является делителем, желательно, чтобы его частота была выше частот модуляции и частот мультипликативного шума. Можно осуществлять модуляцию с большой амплитудой (например, $\pi/2$) на частоте ω_a в одном из рабочих каналов системы. В этом случае сигнал на приемнике будет содержать заметную составляющую на частоте $2\omega_a$ — вторую гармонику несущей частоты. Частоту модуляции ω_a можно подобрать таким образом, чтобы вторая гармоника лежала за пределами частот модуляции. Альтернативным решением может служить ответвление и фазовая модуляция малой части излучения перед тем, как направить его на цель. Частоту модуляции ответвленной части можно сделать очень большой (до нескольких мегагерц), если использовать акустооптические модуляторы.

Следует отметить другой возможный путь — управление полосой пропускания частот адаптивной оптической системы. Действительно, при большой постоянной времени системы влияние шума на ее работу ослабляется. Однако здесь необходимо автоматически выбирать такую полосу, которая, с одной стороны, делала бы систему малочувствительной к шуму, а с другой — позволяла бы компенсировать быстрые возмущения излучения в атмосфере. Модуляция полосы пропускания ведет к изменению интенсивности на цели. Частота такой модуляции должна быть значительно меньше характерной частоты системы (реально — это 10...20 Гц). При этом целесообразно применить, например, модуляцию спектра частот фазовой модуляции. Изменение интенсивности можно отследить с помощью синхронного детектирования на указанной частоте 10...20 Гц.

Разрешение цели передающей апертурой может привести к весьма неприятной разновидности спекл-модуляции — к аддитивному спекл-шуму. Аддитивные компоненты спекл-шума для протяженной цели обусловлены областями зеркального отражения — блестящими точками и диффузным рассеянием поверхности. При наличии нескольких разрешаемых блестящих точек наблюдалась устойчивая локализация пучка на самой блестящей точке (отличие в яркости точек составляло менее 10 дБ). Выделение полезного сигнала можно провести оптимальными методами оценки, для чего строится оценочная функция с использованием информации от автономных доплеровских следящих датчиков расстояния и скорости вращения цели [4].

Рассмотрим характерный пример приближенного расчета ширины спектра частот паразитной модуляции отраженного сигнала.

Пусть поверхность шероховатой цели перемещается со скоростью, имеющей поперечную составляющую v относительно направления распространения света. Тогда ширина спектра $\Delta\omega$ определяется временем перемещения $\tau = a/v$, где a — размер пятна на цели.

Если граничная частота спектра (в герцах) $\Delta\omega/2\pi$ меньше частот модуляции каналов системы апертурного зондирования, то сигналы паразитных частот не проникают в каналы управления и не конкурируют с полезными сигналами.

Заметим, что для систем фазового сопряжения спекл-структура иногда действует более разрушительно. Приведем простой пример, поясняющий это положение. Пусть нам удалось получить на шероховатой цели идеальное пятно света. Отразившись от поверхности, сигнал искажается спекл-структурой, т. е. профиль фазы прошедшего излучения оказывается пространственно неоднородным. Послав к цели фазосопряженную волну, мы уже не получим идеального пятна. В результате происходит дефокусировка излучения. Как правило, работа систем фазового сопряжения по неконтролируемой цели связана с итеративным процессом сходимости.

Одной из особенностей самонастраивающихся экстремальных систем адаптивной оптики, каковыми являются системы апертурного зондирования, оказывается наличие неопределенности взаимного установления фазы в каналах при их относительном сдвиге, кратном 2π ($2N\pi$ -проблема). Для пояснения рассмотрим интерференцию двух пучков, отраженных от двух плоских зеркал. Предположим, что в результате интерференции нам удалось получить яркую светлую полосу на некоторой цели (диафрагме, приемнике, щели и т. п.). Передвинем одно из зеркал так, чтобы оптический путь отраженного излучения изменился на $N\lambda$, где N — целое число (при этом фаза изменяется на $2N\pi$). В результате интерференционная картина не изменится и светлая полоса останется на цели. Таким образом, при максимизации интенсивности на цели возможна неопределенность взаимного положения субапертур адаптивного зеркала. Проблема $2N\pi$ особенно неприятна для адаптивного зеркала с непрерывной деформируемой поверхностью, так как максимумы, соответствующим паразитным фазовым сдвигам на $2N\pi$, оказываются заметно ниже глобального максимума, который соответствует точному фазированию в каналах. Эффект $2N\pi$ -проблемы зависит от формы деформации поверхности зеркала. Например, для гауссовой функции деформации при $2N\pi$ -сдвиге система выходит не на локальный максимум, а на точку перегиба (состояние неустойчивого равновесия). В том и другом вариантах сигнал ошибки равен или близок к нулю, поэтому система может сравнительно надолго задержаться в этих состояниях. В реальной системе наличие шумов, как правило, способствует выводу системы из $2N\pi$ -состояний. Наличие $2N\pi$ -проблемы характерно для систем, компенсирующих сильные фазовые возмущения, которые превышают по амплитуде 2π рад. Если построить зависимость достигаемой интенсивности излучения от амплитуды фазовых возмущений, полагая, что система остается в $2N\pi$ -состояниях, то вид

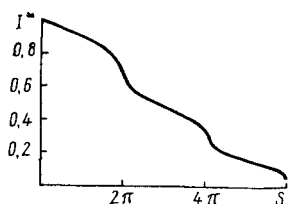


Рис. 11. Характерная зависимость нормированной интенсивности I^* света на цели от амплитуды фазовых возмущений S при попадании системы в $2N\pi$ -состояния

этой зависимости соответствует кривой, изображенной на рис. 11. На кривой четко выделяются «ступеньки», обусловленные попаданием системы в $2N\pi$ -состояния.

В ряде случаев разработчику адаптивных оптических систем необходимо учитывать проблему обеспечения изопланатизма. Эта проблема в простейшей форме показана на рис. 12. Наблюдая протяженный объект через неоднородную среду, обратим внимание на то, что, исправив искажения для центральной точки, мы можем не исправить изображение во всех точках, поскольку за них оказываются «ответственными» другие неоднородности. Благоприятная ситуация складывается, если неоднородности лежат вблизи входной апертуры адаптивного телескопа (см. рис. 12,а). Однако в противном случае (см. рис. 12,б), как легко видеть, изопланатизм может нарушаться.

Проблема изопланатизма характерна не только для систем, строящих изображение объектов. На рис. 12,в схематически показано, как может нарушаться изопланатизм для передающих систем. Это происходит, если за время прохождения сигнала, отраженного движущейся целью, и адаптивного формирования излучения цель успевает переместиться настолько, что сформированный пучок проходит через новые неоднородности. Расстояние «неоднородного экрана» от апертуры оказывается, как и в случае приемных систем, существенным фактором для констатации факта изопланатизма.

Остановимся вкратце на проблеме коррекции теплового самовоздействия. Поглощение части излучения воздухом может привести к нагреву воздушного канала. Этот нагрев сопровождается изменением показателя преломления воздуха, что является причиной дефокусировки света. Для компенсации такой наведенной рассеивающей линзы можно применить как адаптивную, так и программную коррекцию фазы.

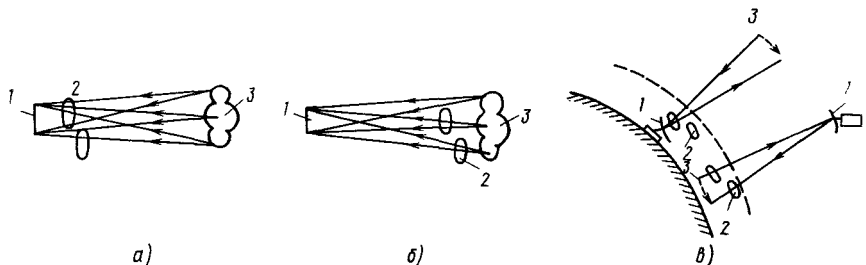


Рис. 12. Иллюстрация проблемы изопланатизма:

а, б — для приемных систем; в — для передающих систем при движении цели; 1 — приемная (приемно-передающая) апертура; 2 — неоднородности среды; 3 — наблюдаемый объект

Программный подход основан на возможности прогноза искажений, сопутствующих распространению света, и создания такого волнового фронта уходящего излучения, который концентрировался бы на цели с наименьшими потерями.

Адаптивная коррекция производится с помощью систем фазового сопряжения и апертурного зондирования.

Существенной особенностью коррекции нелинейных искажений в типичных условиях оказывается то, что осуществить компенсацию адаптивным зеркалом, которое размещено в начале трассы, практически не удастся. Вклад удаленных участков канала распространения оказывается достаточно заметным, поэтому нелинейные искажения нельзя описать в виде одного возмущающего фазового экрана (за исключением достаточно слабых искажений), установленного перед адаптивным зеркалом.

Для имитации нелинейных искажений в экспериментах применяются кюветы с различными веществами.

Так, для генератора света видимого диапазона были использованы смесь газов NO_2 и CO_2 и жидкость — раствор йода в четыреххлористом углероде; для ИК-излучения ($\lambda = 10,6$ мкм) — газы CO_2 , SF_6 (низкая концентрация), жидкость — сернистый углерод. Иллюстрация коррекции сильных искажений дана на рис. 13.

Опыты по коррекции искажений в модельных экспериментах дали удовлетворительные результаты. В будущем исследователи и разработчики должны на практике столкнуться с предсказанным явлением теплового самовоздействия и с необходимостью компенсации этого эффекта средствами адаптивной оптики.

При ознакомлении с особенностями работы адаптивных оптических систем в реальных условиях естественно возникает вопрос: какие системы лучше — фазового сопряжения или апертурного зондирования? Однозначного ответа на него нет. В общем случае трудно отдать предпочтение той или иной системе — необходимо

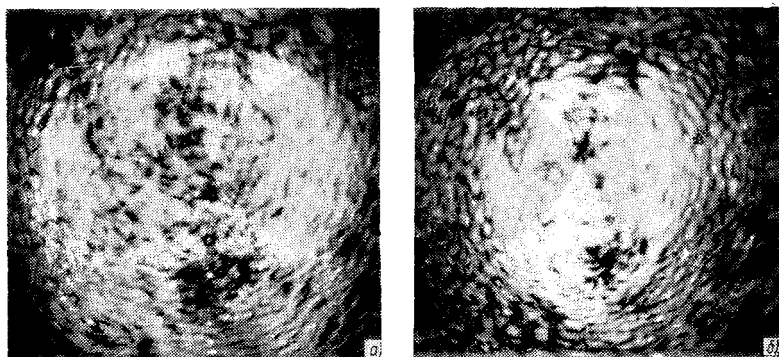


Рис. 13. Результаты адаптивной коррекции сильных искажений светового пучка:

а — без коррекции; *б* — с коррекцией

увязывать характеристики систем с условиями работы. Качественное сопоставление характеристик применительно к задаче фокусировки на удаленном неконтролируемом объекте приведено в табл. 2.

Таблица 2. Качественное сопоставление характеристик систем фазового сопряжения и апертурного зондирования

Характеристика	Система фазового сопряжения	Система апертурного зондирования
Тип оптического приемного устройства	Полностью совмещенная апертура	Совмещенная кольцевая или полностью раздельная апертура
Число и тип детекторов	N ; прямого или гетеродинного детектирования	Один; прямого детектирования
Чувствительность к обратному рассеянию от атмосферы или элементов	Очень высокая	Очень низкая
Взаимодействие с источниками шума	Взаимодействие затруднено	Взаимодействует
Отношение сигнал-шум Опорные точки цели	Высокое Только блестящая точка	Низкое Блестящая точка; край; «черная дыра»; расширяющаяся, диффузно отражающая поверхность с плоской конфигурацией
Преимущества	Высокая скорость обработки; высокая чувствительность при больших расстояниях до цели	Простой приемник; способность к расширению числа опорных точек; компенсация теплового расплывания; универсальность по отношению к рабочей длине волны; компенсация всех возмущений одновременно
Недостатки	Сложность приемника; совмещение и разделение приемно-передающих апертур; потенциальные проблемы, связанные со спекл-эффектами; компенсация теплового расплывания сомнительна	Потенциальные проблемы, связанные со спекл-эффектами; характерная эффективность на расстояниях до 10 км; ограничение ширины полосы пропускания частотами модуляции; возможность попадания в $2N\pi$ -состояния

Для некоторых приложений адаптивной оптики (см. гл. 6) требуется два и более контура управления волновым фронтом, что ведет к интеграции различных типов адаптивных систем. Поэтому в ряде случаев системы фазового сопряжения и апертурного зондирования взаимно дополняют друг друга. Например, пусть име-

ется очень сложная оптическая передающая система, которая работает в условиях целого ряда сильных возмущений. Тогда оставшаяся ошибка только одного контура адаптации может быть настолько значительной, что мы будем находиться еще очень далеко от идеала. В этом случае разумно построить, положим, фазосопряженную систему внутренней коррекции, а систему внешней коррекции реализовать на основе метода апертурного зондирования.

Глава 2.

ЗЕРКАЛА ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРКАЛ

Адаптивное зеркало — это исполнительное устройство адаптивной оптической системы, имеющее отражающую поверхность с деформируемым профилем и удовлетворяющее по амплитуде деформации, числу степеней свободы и полосе пропускания частот управляющего сигнала требованиям, обеспечивающим заданную эффективность компенсации фазовых возмущений оптического излучения.

Конструктивно адаптивные зеркала можно разделить на две большие группы — секционированные зеркала и зеркала со сплошной поверхностью. В секционированных зеркалах каждая отдельная секция допускает ее перемещение и наклон (или только перемещение). Сплошное зеркало под воздействием специальных приводов испытывает сложные деформации. Выбор той или иной конструкции определяется спецификой системы, в которой оно будет использовано. К основным факторам, которые учитываются в данном случае, относятся габаритный размер, масса и качество изготовления поверхности зеркала. В настоящее время секционированные зеркала рассматриваются как основа для создания крупногабаритных телескопов. Подобный телескоп может быть комбинированным. Например, каждая отдельная секция может представлять собой сплошное адаптивное зеркало.

Секционированные зеркала — принципиально наиболее простой класс адаптивных зеркал, поэтому основной объем материала по исполнительным устройствам будет посвящен сплошным адаптивным зеркалам. Последние представляют также наибольший интерес для разработчиков адаптивной оптики и имеют большое число различных, зачастую неординарных вариантов исполнения.

Типичные требования, предъявляемые к адаптивным зеркалам, представлены ниже (первые три характеристики даны в единицах длины световой волны λ).

Размер апертуры, λ		(2...10) · 10 ⁴
Диапазон перемещения поверхности, λ		±3/2

Область локальной деформации, λ	$6 \cdot 10^3$
Полоса пропускания частот, Гц	$0 \dots (10^2 \dots 10^3)$
Точность изготовления поверхности	$\lambda/20$
Максимальное управляющее напряжение, кВ	1,5

Конечно, выбор той или иной характеристики определяется специфическими особенностями системы. Тем не менее данные, приведенные выше и основанные на анализе отечественных и зарубежных работ, дают представление об основных проблемах разработки адаптивных зеркал. Три характеристики являются для адаптивных зеркал специфическими: диапазон перемещений, область локальной деформации и полоса пропускания частот.

Диапазон перемещений характеризуется чувствительностью привода в составе зеркала (обычно чувствительность выражается в перемещениях поверхности в микрометрах при увеличении управляющего напряжения на 1 В).

Область локальной деформации, отражающая число степеней свободы зеркала, может быть задана эффективной шириной деформации единичной амплитуды, вызванной воздействием одного привода. Функция, описывающая эту единичную деформацию и называемая функцией отклика, является одной из важнейших характеристик адаптивного зеркала.

Полоса пропускания частот определяется быстродействием используемого привода и обычно ограничена сверху механическими резонансами самой конструкции зеркала.

Если конструкция зеркала допускает создание колебаний поверхности на частотах фазовой модуляции, принятой для систем апертурного зондирования, то функции коррекции и модуляции могут быть возложены на одно зеркало. Если же механические резонансы лежат ниже требуемой границы значений частот (зачастую это имеет место для зеркал, работающих в ИК-диапазоне), приходится осуществлять модуляцию отдельным модулирующим зеркалом. Конструктивно оно обычно отличается большей жесткостью деформируемой отражающей пластины и меньшей чувствительностью привода, что позволяет осуществлять осцилляции поверхности в десятки килогерц при амплитуде $\lambda/20 \dots \lambda/10$.

К приводу предъявляется противоречивое требование — обеспечить большой динамический диапазон перемещения при высоком быстродействии. В адаптивной оптике можно выделить следующие типы приводов: электромеханический, электромагнитный, гидравлический, пьезоэлектрический и магнитоэлектрический.

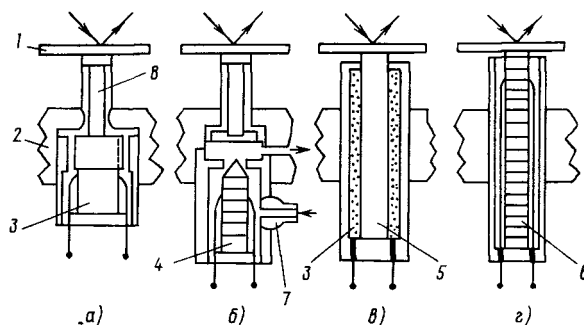
Электромеханический привод, исполнительный механизм которого представляет собой винт, вращающийся от шагового или иного электродвигателя имеет большой диапазон перемещения, но не удовлетворяет типичным требованиям по полосе.

Четыре других типа приводов обладают большей широкополосностью. Схемы исполнительных элементов этих приводов показаны на рис. 14.

Электромагнитный привод имеет движущуюся в магнитном поле катушку, связанную с толкателем и цилиндрической пружиной.

Рис. 14. Электромагнитный (а), гидравлический (б), магнитострикционный (в) и пьезоэлектрический (г) приводы адаптивных зеркал:

1 — отражающая пластина; 2 — опорная плита; 3 — соленоид; 4 — пьезоэлектрический золотник; 5 — магнитострикционный стержень; 6 — пьезокерамический столбик; 7 — штуцер для выпуска жидкости; 8 — толкатель



Постоянный магнит, жестко прикрепленный к опорной плите, одновременно служит для передачи усилия к этой плите.

Электромагнитный привод, работающий на активную нагрузку и требующий непрерывного расхода электроэнергии, как правило, используется в устройствах с малым числом каналов управления — зеркал, изменяющих только наклон волнового фронта.

В гидравлическом приводе давление жидкости регулируется с помощью пьезоэлектрического золотника. При этом давление жидкости действует на цилиндрическую пружину, связанную с поршневым толкателем. Для гидравлического привода, таким образом, требуется реализация двойного источника энергии — гидравлического и электрического. Основные потери энергии в приводе обусловлены турбулентностью жидкости и самоохлаждением.

Принципиально конструкция магнитострикционного привода представляет собой стержень из магнитострикционного феррита, заключенного в катушке соленоида. Только в последнее время удалось реализовать привод, обеспечивающий высокую амплитуду перемещений (10... 50 мкм). Конструкция такого привода, реализующего условия эффектов Джоуля и Видемана, создана в Институте общей физики АН СССР [11].

Наибольшее распространение в адаптивной оптике получил пьезоэлектрический привод. Имеется множество вариантов построения зеркал с пьезоэлектрическим приводом. Пьезоэлектрические зеркала условно можно разделить на четыре группы: выполненные в виде пьезокерамических блоков; с биморфными пьезоэлементами; с трубчатыми пьезоэлементами; с пьезопакетами. На рис. 14 изображен только последний вариант конструктивного исполнения пьезопривода.

Для различных типов адаптивных зеркал мы будем рассматривать особенности различных конструкций и используемых приводов.

Выделим следующие конструкции: секционированные зеркала, сплошные деформируемые зеркала, в том числе монолитные пьезоэлектрические зеркала, мембранные адаптивные зеркала. В заключение кратко рассмотрим конструкции устройств, которые могут быть использованы в адаптивной оптике. Эти устройства, основан-

ные на классических электрооптических эффектах, а также на явлениях фотохимических и фотоструктурных превращений и играющие роль управляемых фазовых транспарантов, являются самостоятельной технической ветвью и широкого использования в адаптивной оптике пока не находят.

2.2. СЕКЦИОНИРОВАННЫЕ ЗЕРКАЛА

Секционированные адаптивные зеркала с поступательным перемещением секций (рис. 15, *а*) позволяют изменять только временные фазовые соотношения между сигналами от отдельных секций (длину оптического пути), а зеркала с перемещением и наклоном секций (рис. 15, *б*) — также и пространственную фазу. С помощью второго типа зеркал можно более точно осуществлять управление волновым фронтом и достигнуть желаемого эффекта при меньшем числе секций (рис. 15, *в*). Однако для обеспечения наклонов по двум осям число приводов зеркала увеличивают.

Необходимость разработки секционированных зеркал возникла в астрономическом приборостроении в связи с тем, что диаметр наземных телескопов достиг некоторой критической величины (5...6 м), превышение которой ведет к большим технологическим сложностям как в изготовлении, так и в эксплуатации [16].

Кроме того, следует учитывать, что стоимость телескопа экспоненциально возрастает с диаметром (стоимость телескопа диаметром 5 м составляет более 20 млн. дол.), в то время как применение составного телескопа позволяет уменьшить стоимость примерно втрое.

Идея секционированного зеркала позволяет создать телескопы большого эффективного диаметра (>10 м) как наземного, так и космического базирования. В других областях техники, таких, как оптическая связь и дальнометрия, секционированные зеркала исторически явились первым шагом к созданию адаптивных зеркал.

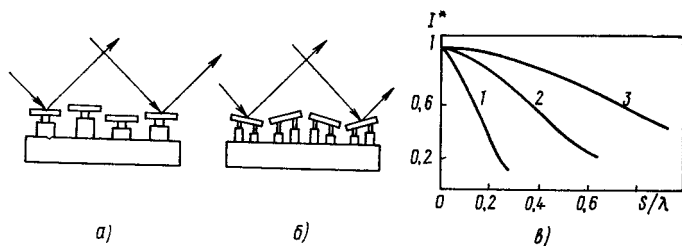


Рис. 15. Секционированные зеркала с поступательным перемещением (*а*), с поступательным перемещением и наклоном секций (*б*) и их характерная эффективность (*в*), выраженная в форме зависимости достигаемой нормированной интенсивности на цели от среднеквадратичной амплитуды возмущений в долях световой волны без коррекции (1), с коррекцией для зеркала типа *а* (2), с коррекцией для зеркала типа *б* (3)

Для поддержания нужной формы главного зеркала телескопа требуется работа датчиков положения каждой секции и контроля состояния поверхности в целом с использованием поступательных и угловых перемещений. Приводы для юстировки секций должны давать большие перемещения (0,1 ... 0,15 мм) с точностью 0,1 мкм в сравнительно узкой полосе частот (1 ... 10 Гц).

Если сравнить сплошную кольцевую апертуру телескопа с кольцевой апертурой, синтезированной из шести установленных вплотную круглых секций, то для последнего случая качество изображения (резкость) ухудшается на 25%.

Величина зазора между элементами составного зеркала оказывает влияние на качество формирования оптического луча или изображения секционированного зеркала в том случае, если элементы занимают большую площадь апертуры зеркала, и практически это влияние незаметно, если их суммарная площадь не превышает 1% от общей площади зеркала. Так, для зеркала диаметром 7 м, состоящего из 37 секций шестиугольной формы, расчетная величина зазора составляет 7,5 мм.

Существенными недостатками секционированных зеркал является необходимость контроля положения отдельной секции и состояния ее поверхности, а также сложность реализации системы термостабилизации подобных зеркал.

Секционированные зеркала, как указывалось в § 1.3, применялись в первых экспериментах по адаптивной фазовой компенсации искажений (в первых системах КОАТ), а также для улучшения разрешения телескопа при наблюдении звезд через турбулентную атмосферу. В последнем случае зеркало состоит из шести алюминированных стеклянных зеркал с габаритными размерами $1,25 \times 1,9 \times 0,5$ см, установленных в линейку с промежутками 0,15 см на пьезоэлектрические полые цилиндры. Электроды нанесены на обе стороны стенок цилиндра. Под действием напряжения ± 1000 В цилиндры поступательно перемещают каждое зеркало на $\pm 2,5$ мкм, 18 юстировочных винтов позволяют сделать плоскости всех зеркал параллельными.

2.3. СПЛОШНЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ ЗЕРКАЛА

Рассмотрим зеркала, состоящие из деформируемой отражающей пластины и дискретных приводов, действующих по нормали к поверхности и размещенных между этой пластиной и опорой. В отличие от секционированных зеркал такое построение позволяет легко осуществлять охлаждение и контроль поверхности в процессе работы. Поэтому сплошные зеркала признаются более перспективными для излучательных систем. Приводы этих зеркал могут быть как жесткие, регулирующие положение поверхности, так и упругие, действующие на поверхность через пружину.

Особенность сплошных зеркал — наличие взаимодействия между соседними точками деформируемой поверхности. Это взаимодействие отражает функция отклика, имеющая характерную коло-

колообразную форму. Амплитуда перемещения поверхности для сплошных зеркал определяется не только динамическим диапазоном привода, но и, очевидно, упругими свойствами отражающей пластины, ее толщиной, расстоянием между точками крепления приводов, диаметром пятна соприкосновения толкателя с тыльной поверхностью пластины. Наиболее значительные перемещения поверхности достигаются при применении винтовых приводов, подключенных к электродвигателю.

Конструкция такого зеркала представлена на рис. 16. Зеркало создано для работы в системе апертурного зондирования фирмой Rockwell International (США) и предназначено для коррекции температурных искажений и неточностей, допущенных при изготовлении и монтаже оптических систем ИК-диапазона.

Зеркало имеет диаметр 400 мм, радиус кривизны 10,325 м и состоит из алюминиевой отражающей пластины толщиной 6 мм (1), приводимой в движение с помощью 19 винтов (2), вращающихся от 10 шаговых электродвигателей (4). Минимально разрешаемое перемещение поверхности составляет 0,025 мкм в диапазоне ± 20 мкм. Винтовые приводы жестко связаны с опорной плитой пьезоэлектрическими шайбами, которые позволяют осуществлять фазовую модуляцию отраженного от зеркала оптического сигнала. Амплитуда перемещения поверхности зеркала при подаче переменного напряжения на обкладку шайбы составляет 0,5 мкм. Приводы расположены так: один в центре зеркала, шесть по окружности с радиусом 7 см и затем еще 12 по окружности с радиусом 14 см. Такую схему расположения приводов по окружностям в углах правильных шестиугольников называют гексаго-

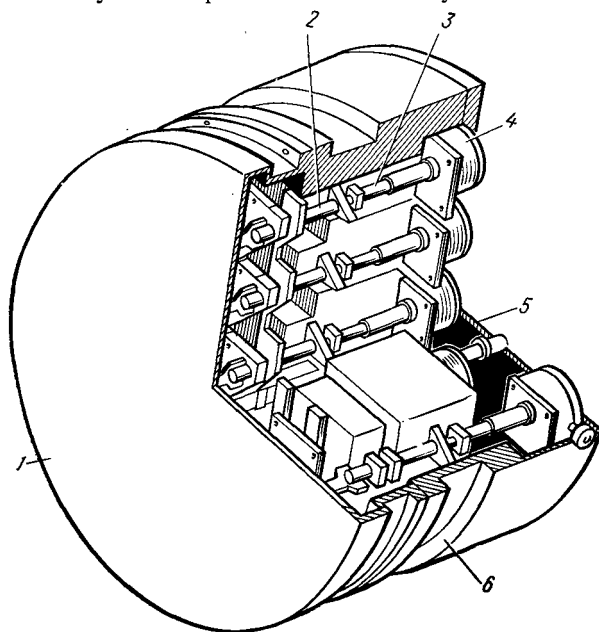
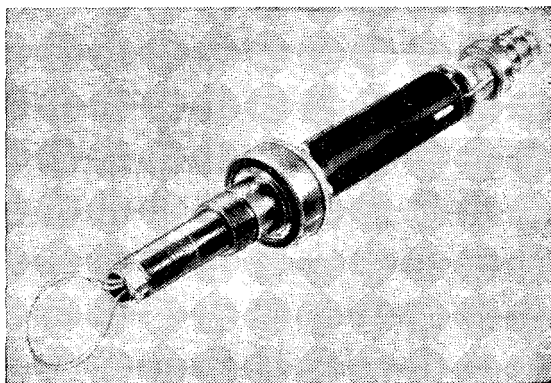


Рис. 16. Конструкция деформируемого (сплошного) адаптивного зеркала:

1 — отражающая пластина; 2 — винтовой привод; 3 — пьезоэлектрический модулирующий привод; 4 — шаговый электродвигатель; 5 — пластина герметизации; 6 — корпус зеркала

Рис. 17. Пьезопровод на основе пьезопакета с дифференциальным юстировочным винтом



нальной упаковкой приводов. В этом случае расстояния до ближайших соседних приводов равны между собой.

Для компенсации высокочастотных фазовых возмущений, обусловленных, например, турбулентностью среды, такие узкополосные зеркала непригодны. Здесь, как правило, применяются зеркала с пьезоэлектрическим приводом.

Деформируемая пластина может быть выполнена монолитной, слоистой или пористой, а также с ячейками и каналами.

В качестве приводов используются пьезопакеты, т. е. устройства, представляющие собой столбик, набранный из большого числа пьезокерамических параллелепипедов или дисков с электродами на верхней и нижней гранях, соединенными электрически параллельно. Один из таких приводов с дифференциальным юстировочным винтом, разработанный В. Г. Тараненко (1980 г.), изображен на рис. 17. Конструкция зеркала с пьезопакетами позволяет увеличить чувствительность простым увеличением числа элементов в пьезопакете. Следует выделить многослойные пьезопакеты, где число слоев достигает 100 и более. Чувствительность таких пьезопакетов весьма высока и может составлять $15 \cdot 10^{-3}$ мкм/В и более. В частности, отечественные разработки, проведенные под руководством Б. Г. Парфенова (рис. 18), позволяют получать подобную и большую чувствительность при значительном усилии, передаваемом деформируемой пластине (силовой пьезопровод).

Основная сложность при увеличении чувствительности заключается в том, что при сохранении разумной длины пьезопакета, обеспечивающей его жесткость, рост числа слоев требует уменьшения максимального электрического напряжения, прикладываемого к приводу. Это связано с тем, что уменьшение толщины слоя ведет к росту напряженности электрического поля, а следовательно, и к возможной потере поляризации пьезокерамики.

В настоящее время пьезопакеты рассматриваются как основной вариант при создании адаптивных зеркал, удовлетворяющих требованиям, приведенным выше, в особенности для систем среднего ИК-диапазона.

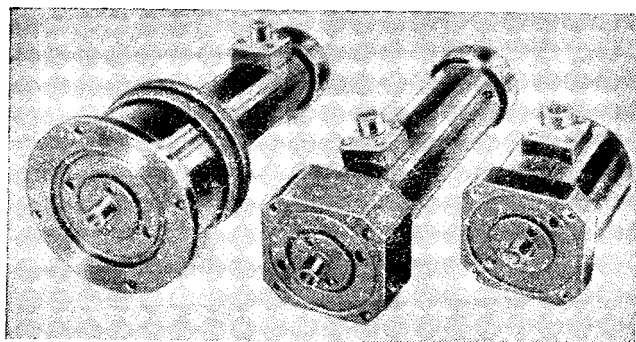


Рис. 18. Общий вид унифицированных пьезопроводов

Решение проблемы создания силового привода для адаптивной оптики на базе пьезопакета достигается двумя путями: армированием его конструкции и составлением привода из отдельных пьезопакетов, соединенных клеем. Армирование может осуществляться с помощью шпильки, корпуса или мембраны. В [21] представлен пьезопровод, армированный шпилькой. Такой привод длиной 85,6 мм в составе зеркала имеет чувствительность 10^{-2} мкм/В.

Гистерезис, имеющий место при использовании пьезокерамических материалов, как показали исследования, слабее выражен для керамики с умеренным значением пьезомодуля, характеризующего удельное изменение размера элемента при подаче электрического напряжения. Поэтому при создании пьезопакетов чаще всего используется керамика типа цирконат-титанат свинца (ЦТС или в иностранной аббревиатуре PZT). Гистерезис привода в составе зеркала ($\leq 10\%$) меньше, чем гистерезис свободного привода.

Емкость пьезопровода, построенного на базе многослойного пьезопакета, весьма высока. В этом случае усилитель электрического напряжения работает на реактивную нагрузку, что ведет к диссипации мощности в усилителе и пьезопроводе, имеющей вид $P = 2\pi\nu_0 C U^2$, где ν_0 — частота приложенного напряжения U ; C — емкость пьезопровода.

С учетом диссипации ограничения, накладываемые на перемещение поверхности зеркала, можно условно выразить зависимостью, представленной на

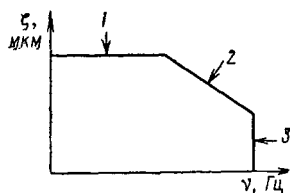


Рис. 19. Типичные ограничения на амплитудно-частотную характеристику адаптивного зеркала:

1 — длина пьезопакета и порог деполяризации; 2 — потери мощности на реактивной нагрузке; 3 — механические резонансы зеркала

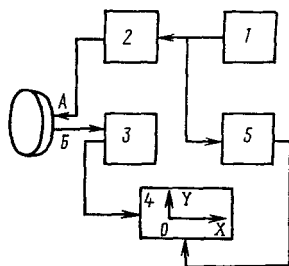


Рис. 20. Блок-схема установки для исследования частотных свойств адаптивного зеркала

рис. 19. Она отражает амплитудно-частотную характеристику адаптивного зеркала и показывает, что перемещение поверхности по мере увеличения частоты управляющего сигнала ограничено вначале преимущественно длиной пьезопакета и деполяризующим напряжением пьезокерамики, затем диссипацией мощности и, наконец, механическими резонансами зеркала.

Диссипация части мощности при высоких напряжениях и частотах приводит к нагреву, а следовательно, и тепловому расширению пьезопривода. Однако этот процесс происходит достаточно медленно (насыщение наступает после 10...12 мин работы, температура привода за это время повышается примерно на 15...20 К) и поэтому может быть частично отработан адаптивным зеркалом.

Исследования деформируемых зеркал показали, что перемещение поверхности является линейной функцией приложенного напряжения. При этом коэффициент пропорциональности — чувствительность адаптивного зеркала — убывает с ростом жесткости деформируемой пластины. Потерю чувствительности можно оценить по эмпирической формуле

$$k = k_0 \left(1 - \frac{\gamma D_{\text{ж}}}{h} \right),$$

где k , k_0 — чувствительность пьезопривода в составе зеркала и в свободном состоянии соответственно; $D_{\text{ж}} = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ — жесткость; E и ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала соответственно; h — толщина пластины. Коэффициент γ зависит от жесткости привода, наличия люфта, способа крепления к поверхности. Для пьезоприводов с толкателями диаметром 20 мм, выполненных из ЦТС-19 и не имеющих люфта, $\gamma = 6 \cdot 10^7 \text{ Н}^{-1}$.

Функция отклика на основании эмпирических данных аппроксимируется выражением

$$f(\rho) = \exp \left(- \frac{|\rho|^\alpha}{\omega_0^\alpha} \right),$$

где $\alpha = 1,5 \dots 2,5$. Наиболее часто $\alpha = 2$ и $f(\rho)$ представляется гауссовой функцией. Здесь ρ — координата точки на поверхности зеркала; ω_0 — характерная ширина функции отклика. Величина ω_0 зависит от расстояния между приводами, жесткости пластины, диаметра толкателя, способа соединения привода с поверхностью и т. д. Изменения ширины функции отклика для данного зеркала можно достичь варьированием диаметра толкателя. При этом с уменьшением этого диаметра ширина функции отклика возрастает.

Расчет резонансных частот для системы привод — пластина достаточно сложен. Известная из теории упругости формула для первой резонансной частоты закрепленной круглой пластины

$$\nu_1 = \frac{10,21}{2\pi d^2} \sqrt{\frac{D_{\text{ж}}}{h\rho_{\text{м}}}},$$

где d — расстояние между центрами приводов; $\rho_{\text{м}}$ — плотность материала пластины, не всегда дает верный результат и может использоваться, по-видимому, только для оценки по порядку величины. Поэтому механические резонансы зеркала обычно определяются экспериментально.

Схема эксперимента проста и в общих чертах сводится к следующему (рис. 20). Переменное напряжение различной частоты от генератора 1 через усилитель 2 подают на привод, обозначенный буквой А. Колебание зеркальной

пластины при воздействии привода A за счет пьезоэффекта вызывает на соседнем приводе B появление переменного напряжения, которое через усилитель 3 подается на измеритель напряжения 4 . Для развертки полученного сигнала по двум осям OX и OY на ось OY подается напряжение от привода B , а на ось OX — от преобразователя частоты 5 .

Передаваемое усилие P_y зависит от деформации пластины ζ и в предположении абсолютной жесткости привода и основания для точечной нагрузки приближенно может быть оценено из уравнения

$$\zeta = \frac{P_y d^2}{16\pi D_{\text{ж}}} \frac{3 + \nu}{1 + \nu}.$$

Как видно из формулы, величина P_y прямо пропорциональна жесткости пластины. При фиксированной толщине пластины для стекла, например, требуется усилие, в 1,8 раза меньшее, чем для молибдена.

В настоящее время достигнутые характеристики зеркал с пьезопакетами имеют следующие значения:

Чувствительность, мкм/В	(1...5) · 10 ⁻²
Функция отклика	$e^{-\alpha p^2}$, $e^{-\beta p^{2,5}}$
Механический резонанс, кГц	2...4
Передаваемое усилие, Н	(1...4) · 10 ²
Гистерезис, %	15...20
Емкость, мкФ	10 ⁻² ...1
Температурная стабильность, мкм/К	5 · 10 ⁻² ...10 ⁻¹

Рассмотрим для примера зеркало для управления фазой ИК-излучения разработки фирмы Unated Technologies Corporation (США) с 52 сменяемыми пьезоприводами и размером активной области поверхности 21 см. Это зеркало при работе в системе апертурного зондирования КОАТ действует в паре с модулирующим зеркалом. Отражающая пластина выполнена из молибдена. Молибден является одним из наиболее подходящих материалов для оптических элементов систем, работающих в условиях тепловых нагрузок. Выбор молибдена обычно обусловлен его высокой теплопроводностью, низким коэффициентом линейного расширения, высоким модулем упругости и способностью к полированию.

Диапазон перемещений поверхности корректирующего зеркала составляет ± 20 мкм при напряжениях ± 500 В, в то время как амплитуда колебания поверхности модулирующего зеркала равна 0,4 мкм при 1000 В.

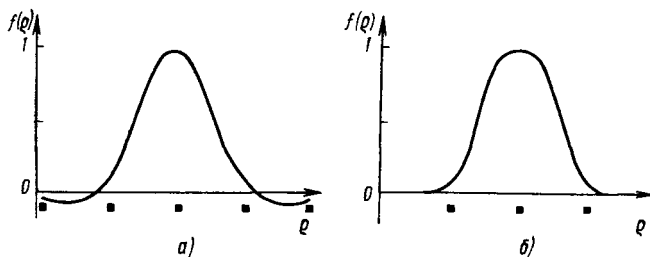


Рис. 21. Функции отклика пары адаптивных зеркал: a — корректирующее зеркало; $б$ — модулирующее зеркало

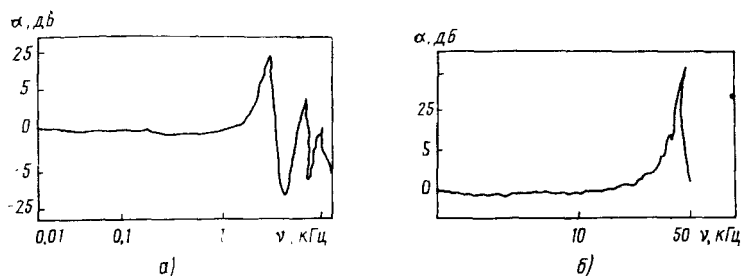


Рис. 22. Частотные характеристики пары адаптивных зеркал:
 а — корректирующее зеркало; б — модулирующее зеркало

Результаты измерения функции отклика указанных зеркал показаны соответственно на рис. 21. Положения приводов показаны черными квадратами. Функция отклика корректирующего зеркала (а) аппроксимируется гауссовой функцией

$$f(\rho) = \exp [\ln 0,15 (\rho/d)^2]$$

и может принимать малые отрицательные значения.

Частотные характеристики данной пары зеркал приведены на рис. 22, из которого видно, что первый резонанс первого зеркала лежит на частоте 3 кГц. Такое положение резонанса не позволяет использовать это зеркало одновременно для коррекции и модуляции, что и послужило причиной создания парного зеркала. Первый резонанс второго зеркала расположен на частоте 50 кГц, которая лежит правее полосы частот фазовой модуляции.

Перспективным для использования в адаптивных зеркалах с пьезопакетами является цифровой пьезопровод, создающий дискретное перемещение. Его простейшая схема изображена на рис. 23. С одной стороны, цифровой пьезопровод упрощает электронную схему управления, а с другой — сопрягается с цифровой аппаратурой. В отличие от аналогового в цифровом пьезопроводе осуществляется управление малыми напряжениями в ключевых схемах. Достоинством цифрового пьезопровода является значительное уменьшение гистерезиса, поскольку в простейшем варианте каждый элемент имеет

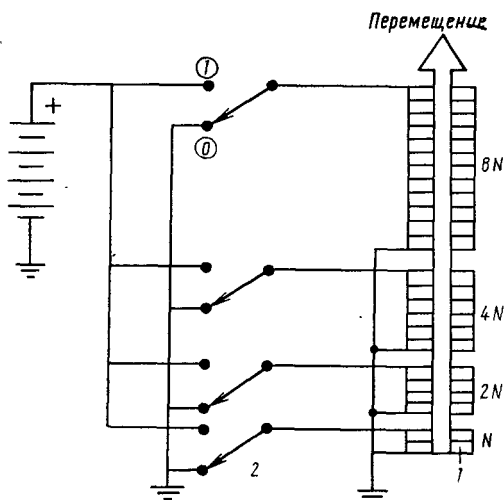


Рис. 23. Схема цифрового пьезопровода:
 1 — пьезопакет из N элементов; 2 — ключевая схема с состояниями 0 и 1

только два состояния в зависимости от входного сигнала. Использование цифрового пьезопривода позволяет снизить потребление энергии приводом каждого канала и системы в целом.

Достижение необходимой точности управления осуществляется увеличением разрядности цифрового пьезопривода и (или) добавлением элементов с меньшей чувствительностью, а также использованием гибридного (цифро-аналогового) режима работы. Рассмотрим кратко другие варианты пьезоприводов в деформируемых зеркалах.

Пьезоприводы трубчатой конструкции (см. § 2.2) имеют электроды на внешней и внутренней стенках пьезоэлементов. Эта структура обладает хорошими механическими качествами. Чувствительность определяется длиной трубки и составляет примерно $0,8 \cdot 10^{-3}$ мкм/(В·см). Трубчатые пьезоприводы могут быть выполнены как в виде одиночных прямых трубок, так и в виде нескольких, установленных рядом или коаксиальных трубок, у которых нижнее основание соединено с верхним основанием соседней трубки с целью достижения большего эффекта при сохранении небольшой (1...2 см) высоты привода. Трубчатые пьезоприводы используются в адаптивной оптике, как правило, в видимом и лежащем близко к видимому ИК-диапазоне.

Особый класс пьезоприводов представляет привод типа «гусеница», основанный на создании бегущей волны сжатия в полых concentрических пьезоэлектрических цилиндрах, на которые последовательно подаются электрические сигналы, что позволяет увеличить линейное перемещение привода.

К адаптивным зеркалам с биморфными пьезоэлементами (рис. 24) можно отнести конструкцию с дискретным приводом и ее модификацию — сплошной биморфный блок. Простейший биморфный пьезоэлемент состоит из жестко скрепленных между собой двух слоев пьезокерамики с противоположным направлением поляризации. Подача электрического напряжения на такой элемент вызовет расширение одного слоя и сжатие другого, т. е. изгиб двухслойного элемента. Дискретный привод имеет высокую чувствительность ($\sim 8 \cdot 10^{-3}$ мкм/В), которая возрастает с увеличением длины биморфного пьезоэлемента. Зеркало с биморфным пьезоэлементом удовлетворяет требованиям, приведенным выше, по перемещению и полосе пропускания частот. Недостатком его является сильная зависимость величины деформации от жесткости деформируемой пластины. Эта зависимость — следствие сравнительно малых усилий, реализуемых биморфным приводом.

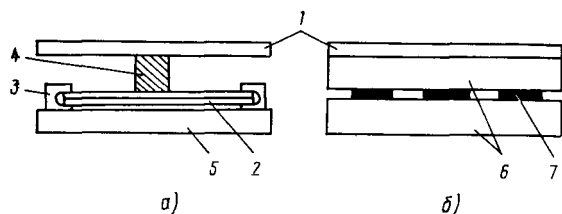


Рис. 24. Схема адаптивного зеркала с биморфными пьезоэлементами:

а — конструкция с дискретным приводом; б — сплошной биморфный блок; 1 — отражающая пластина; 2 — биморфный пьезоэлемент; 3 — держатель; 4 — толкатель; 5 — основание; 6 — пьезокерамика; 7 — электроды

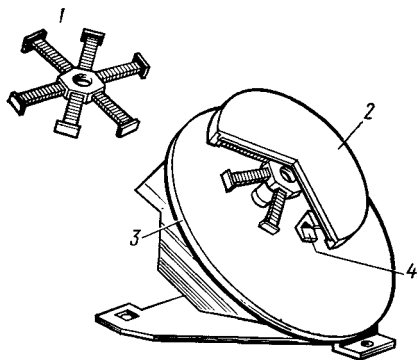


Рис. 25. Адаптивное зеркало с радиальным изгибающим моментом:
1 — блок пьезокерамических приводов; 2 — адаптивное зеркало; 3 — бериллиевая плита; 4 — датчики положения

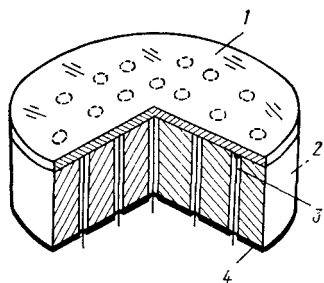


Рис. 26. Монолитное пьезоэлектрическое зеркало:
1 — отражающая пластина; 2 — пьезоблок; 3 — управляющие электроды; 4 — общий электрод

Сплошной биморфный блок имеет характерную чувствительность около $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм/В. Это значение может возрасти примерно втрое, если использовать полный прогиб всего зеркала, подавая на каждый электрод соответствующее напряжение. Такая конструкция может оказаться полезной при управлении фокусом.

Выше рассмотрены конструкции зеркала, требующие наличия опоры. В зеркалах с изгибающим моментом изгиб зеркала обусловлен наличием воздействия, параллельного отражающей пластине. Этот метод деформации позволяет регулировать форму поверхности зеркала без создания внешнего усилия со стороны опорной плиты. Для коррекции аберраций низкого порядка фирмой Perkin-Elmer (США) было разработано зеркало с водяным охлаждением с тремя пьезоэлектрическими приводами, расположенными параллельно отражающей поверхности, как показано на рис. 25.

Данное зеркало с радиальным изгибающим моментом позволяет создать поверхность, которая может быть выражена с помощью полиномов, соответствующих компенсируемым аберрациям.

Зеркало диаметром 180 мм изготовлено из деформируемой молибденовой пластины толщиной 9,5 мм, которая представляет собой пакет из трех пластин. Первая — отражающая пластина — имеет водяное охлаждение. Вторая и третья пластины служат соответственно для уплотнения и объединения всей конструкции. К последней крепятся приводы, объединенные в блок 1: Каждый привод состоит из двух пакетов по 44 диска в каждом. Приводы крепятся винтами к задней пластине зеркала. Линейное перемещение приводов достигает 28 мкм при напряжении ± 1000 В. Зеркало устанавливается на бериллиевой подставке. Обратная связь происходит при контроле деформации зеркала с помощью шести датчиков положения, соединяющих деформируемую пластину и бериллиевую подставку. Разрешение этих датчиков составляет 0,1 мкм смещения поверхности.

Зеркало корректирует дефокусировку (кривизну поля) с амплитудой $\pm\lambda$ и астигматизм с амплитудой $\pm\lambda/2$ при $\lambda=9,27$ мкм. Среднеквадратичная ошибка управления поверхностью составляет 0,12 мкм. Гидравлические и тепловые деформации поверхности не превышают 0,45 мкм при расходе воды 50 л/мин и могут быть частично устранены с помощью приводов (до 0,29 мкм). Ширина полосы пропускания частот системы управления составляет 100 Гц. Частотная характеристика зеркала свободна от резонансов на полосе менее 750 Гц. Зеркало при коррекции указанных aberrаций не уступает по эффективности зеркалу с 19 приводами, действующими нормально к поверхности. Деформация поверхности соответствует корректируемым aberrациям. Если предположить, что пучок падает на зеркало нормально, то aberrация эквивалентна трем цилиндрическим поверхностям, повернутым на углы 0,45 и 90° относительно друг друга. Отклонение формы поверхности от цилиндрической не превышает 7%. Одновременное воздействие трех приводов приводит к суперпозиции трех цилиндрических мод. Так как приводы расположены несимметрично относительно оси зеркала, то дополнительно возникают поперечные силы, вызывающие пренебрежимо малые перемещения.

В последнее время появились проекты так называемых двухуровневых адаптивных зеркал. Разработка зеркал является отражением тенденции роста апертуры. Зеркала выполняются в виде секционированного зеркала с деформируемыми секциями и предназначены для крупных телескопов наземного или космического базирования.

Монолитное пьезоэлектрическое зеркало выполнено из единого пьезокерамического блока с наклеенной на верхнее основание отражающей пластиной (рис. 26). Это зеркало было разработано фирмой Itek (США) для коррекции атмосферной турбулентности в оптическом телескопе. Зеркало представляет собой цилиндр высотой 1,5 и диаметром 12 см с 21 управляющим электродом. Общий электрод расположен на нижнем основании, а управляющие электроды, на которые подается управляющее напряжение, подведены под отражающую пластину.

Чувствительность монолитного зеркала значительно меньше, чем у рассмотренных зеркал, и равна $(0,15 \dots 0,45) \cdot 10^{-3}$ мкм/В, что требует высоких значений управляющего напряжения (1...2 кВ).

Рассматриваемый тип зеркала обладает хорошими частотными свойствами. Резонансные частоты зеркала расположены выше 25 кГц, что позволяет использовать их в широкополосных адаптивных системах, в том числе в качестве модулирующего зеркала. Физически это объясняется тем, что резонирует не зеркальная пластина, а все зеркало в целом, имеющее сравнительно большую толщину. Демпфирование зеркала осуществляется акустически поглощающим материалом, окружающим монолитное зеркало. Резонансы наблюдаются на частотах 28, 31, 35, 42, 49 и 60 кГц.

На базе монолитного зеркала фирмой Unated Technology (США) было создано зеркало с охлаждением, предназначенное

для снижения тепловых искажений зеркал оптических резонаторов когерентных источников. Модернизация заключалась в применении трех пластин вместо одной. Отражающая пластина имеет желобки для стока охлаждающей жидкости (в качестве охлаждающей жидкости обычно используется вода), концы которых объединены поперечной проточкой. Желобки закрываются дополнительной пластиной с отверстиями, служащими для подачи и стока жидкости. Обе пластины выполнены из молибдена и герметично спаяны друг с другом. Третья — стеклянная пластина — располагается между второй пластиной и пьезокерамическим блоком для изоляции металлических пластин от электродов управления.

Для эффективного охлаждения жидкость должна направляться как можно ближе к отражающей поверхности. Однако такую возможность ограничивают два фактора:

- высокие требования к качеству оптической поверхности;
- ошибки, допущенные при изготовлении зеркала.

Применение молибденовой пластины снижает чувствительность поверхности зеркала с 0,43 до 0,17 мкм/кВ по сравнению с зеркалом, имеющим стеклянную пластину, однако позволяет использовать такие зеркала в системах, требующих термостабилизации.

Зависимость перемещения поверхности зеркала от приложенного к электроду напряжения является линейной возрастающей функцией. Функция отклика несколько шире, чем у неохлаждаемого зеркала со стеклянной пластиной, и может быть аппроксимирована гауссовой функцией. Для уменьшения пика резонанса применялся демпфирующий акустически поглощающий материал. Измерения показывают, что наличие охлаждающей жидкости приводит к существенному уменьшению амплитуды резонансов по сравнению с неохлаждаемой конструкцией.

Монолитные пьезоэлектрические зеркала имеют ряд преимуществ перед другими типами зеркал. Наряду с хорошими механическими свойствами эти зеркала обладают высокой точностью, большой широкополосностью и успешно применяются для коррекции атмосферной турбулентности. Размер апертуры может быть доведен до 200 мм, полоса частот пропускания — до 100 кГц. Однако практический предел чувствительности $0,5 \cdot 10^{-3}$ мкм/В ограничивает применимость этого зеркала для широко используемого сейчас ИК-диапазона. Поэтому монолитные зеркала предназначены в основном для систем видения, устранения фазовых возмущений внутри оптических резонаторов, а в системах КОАТ используются в качестве модулирующих зеркал.

Некоторое повышение чувствительности достигается в других конструкциях зеркал, выполненных в виде пьезокерамических блоков (рис. 27). Так, траншейное зеркало (см. рис. 27, а), названное так за имеющиеся в монолитном пьезоблоке углубления с проводящим наполнителем, имеет более высокую чувствительность ($\sim 0,7 \cdot 10^{-3}$ мкм/В).

Многослойное зеркало (см. рис. 27, б) состоит из нескольких слоев пьезокерамики с расположением электродов в виде кирпич-

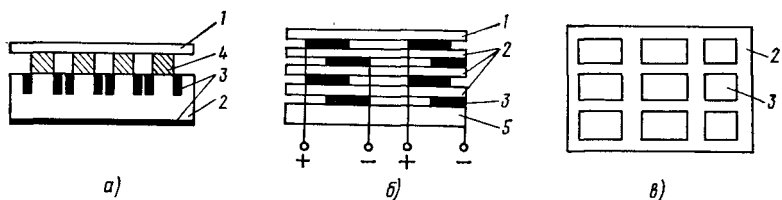


Рис. 27. Схемы траншейного (а), многослойного (б) и сотового (в) зеркал, выполненных в виде пьезоблока:

1 — отражающая пластина; 2 — пьезоблок; 3 — электроды; 4 — толкатели; 5 — основание

ной кладки. Оно представляет собой как бы неразрезанную на отдельные пьезопакеты конструкцию. Чувствительность составляет примерно $1,3 \cdot 10^{-3}$ мкм/В. Оптимальное число слоев равно восьми. Дальнейшее увеличение числа слоев не дает требуемого эффекта, так как жесткость конструкции возрастает и воздействие на вышележащие слои затухает. Уменьшение толщины слоев требует уменьшения электрического напряжения для сохранения поляризации пьезокерамики.

Сотовое зеркало (см. рис. 27, в) представляет собой полую решетчатую конструкцию с ячейками квадратной, шестиугольной или иной формы, заполненными серебросодержащей пастой. Эта конструкция реализует перемещение, обусловленное поперечной составляющей пьезоэлектрического модуля. Характерная толщина стенки ячейки 0,3...1 мм, длина ячейки 40...75 мм, поперечный размер ячейки 2...5 мм. Чувствительность сотового зеркала сравнительно высока ($\sim 7,2 \cdot 10^{-3}$ мкм/В), что, несмотря на технологические сложности его изготовления, вызывают интерес к такой конструкции.

Принцип действия мембранных адаптивных зеркал основан на электростатическом взаимодействии натянутой отражающей плен-

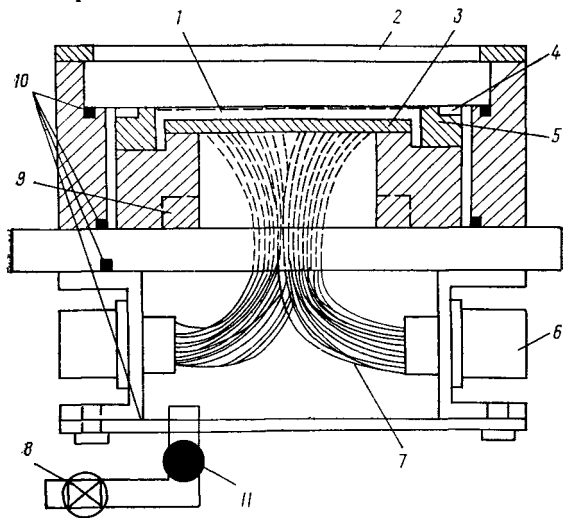


Рис. 28. Конструкция мембранного зеркала:

1 — мембрана; 2 — окно; 3 — плата с электродами; 4 — майларовые прокладки; 5 — оправа мембраны; 6 — электрический разъем; 7 — многожильный провод с тефлоновой изоляцией; 8 — штуцер для откачки воздуха; 9 — пружина; 10 — кольца; 11 — запирающий клапан

ки с электродами, расположенными на некотором расстоянии от поверхности. Конструкция мембранного зеркала (патент фирмы Perkin-Elmer) представлена на рис. 28. Мембрана толщиной 0,5...1,5 мкм помещается между прозрачным электродом и группой приводов. К электроду приложено напряжение смещения. Приводы состоят из набора проводящих прокладок, к которым приложено напряжение. Расстояние между мембраной и электродами составляет 50...100 мкм, причем мембрана заземлена. Если электрическое напряжение отсутствует, то мембрана не испытывает никаких перемещений и сохраняет свою плоскую форму с точностью до среднеквадратичного отклонения 0,03 мкм. Мембрана отклонится, если к какому-либо электроду будет приложено напряжение, при этом центр деформации будет располагаться над данным электродом. При напряжении менее 100 В отклонение мембраны составляет примерно 0,3 мкм. Если использовать большое число электродов для деформации, то нетрудно получить прогиб, в десятки раз превышающий это значение.

В [4] описано мембранное зеркало диаметром 100 мм, его внутренняя полость откачана до давления около 266 Па, что связано с требованиями демпфирования мембраны. Электроды изготавливаются так же, как печатные платы, а их поверхность полируется до такой степени, чтобы отклонения от плоскости составляли не более 1...2 мкм. Одним из главных элементов мембранного зеркала является входное окно, покрытое прозрачным проводящим слоем. Процесс изготовления таких систем достаточно прост и не требует значительных затрат, что позволяет создавать весьма надежные и прочные зеркала.

Фирма Perkin-Elmer разработала технологию изготовления мембран толщиной 0,25 мкм и диаметром до 125 мм, которая состоит в напылении материала на подложку в вакуумной камере. Полученную таким способом мембрану натягивают на кольцевую оправу и закрепляют эпоксидным олигомером. Ниже представлены характеристики мембранного зеркала.

Материал	Титан
Диаметр, мм	50 (размер активной области 25 мм)
Резонансная частота, кГц	3,8
Толщина, мкм	1,4
Натяжение, Н/м	429
Предел текучести	$3,5 \cdot 10^8$
Расстояние от мембраны до электродов и до окна, мкм	52/63
Приводы	Гексагональная решетка из 53 электродов на площади диаметром 25 мм

Влияние усталости материала мембраны на частотные характеристики исследовалось в течение трех месяцев на натянутой никелевой мембране толщиной 1 мкм при давлении $4 \cdot 10^1$ Па (0,3 мм рт. ст.). Результаты измерений показали, что частота

практически не меняется. Для исследованных различных типов мембран получена линейная зависимость частоты первого резонанса от давления.

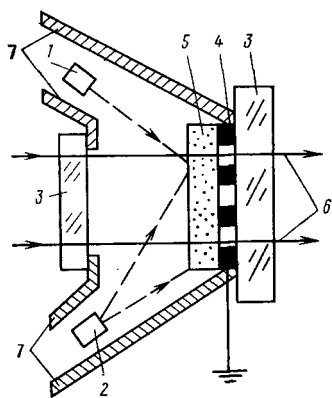
Динамические характеристики мембранных зеркал в большей степени зависят от демпфирующих свойств воздуха, обусловленных его вязкостью. Так, наблюдаемые при давлении 0,06 Па ($4 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.) осцилляции мембраны полностью исчезают при давлении 226 ... 266 Па (~ 2 мм рт. ст.). Время успокоения мембраны при давлениях около 266 Па составляет приблизительно 10 ... 100 мкс в зависимости от толщины и материала мембраны.

2.4. ДРУГИЕ ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ

Определенный интерес для адаптивной оптики имеют устройства, разрабатываемые в смежных областях физики и техники — динамической голографии, радиооптике, оптической обработке информации. К ним относятся управляемые транспаранты, осуществляющие фазовую модуляцию оптического излучения с использованием пучка электронов или соответствующего светового сигнала. Транспаранты позволяют осуществлять формирование пространственного рельефа с частотой $10 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ и полосой пропускания частот $10 \dots 10^3 \text{ Гц}$ и более. Мы дадим лишь понятие о таких устройствах, отсылая желающих более подробно ознакомиться с ними к [6] и к специальной литературе.

Управляемые транспаранты, как правило, имеют трехтактный режим работы — создание рельефа (запись), собственно преобразование оптического сигнала (считывание) и разрушение рельефа (стирание). Запись и стирание могут производиться либо пучком электронов, либо излучением оптического источника.

Рассмотрим один из вариантов электронно-адресуемого устройства на основе охлаждаемого кристалла DKDP (рис. 29).



Принцип действия устройства основан на изменении показателя преломления кристалла с помощью создания на его поверхности зарядового рельефа сканирующим электронным пучком. Стирание рельефа производится второй электронной пушкой. Апертура устройства невелика — $50 \times 50 \text{ мм}$, что, кстати сказать, характерно для всех управляемых транспарантов. В последнее время получили распространение электронно-адресуемые транспаранты на жидких кристаллах.

Примером оптически управляемых транспарантов являются устройства, известные под общим названием «Рутикон». В общем виде устройства типа «Рутикон» состоят из фотопроводника и примыкающего к нему слоя эластомера, имеющего большое электрическое сопротивление. Они помещаются между электродами, из которых, по крайней мере, один

Рис. 29. Схема электронно-адресуемого фазового модулятора: 1, 2 — записывающая и стирающая электронные пушки; 3 — прозрачные окна; 4 — прозрачный электрод; 5 — кристалл; 6 — модулируемое излучение; 7 — вакуумированная камера

прозрачен. Облучение фотопроводника при записи вызывает пространственную модуляцию электрического поля между электродами, взаимодействующего со связанными электронами фотопроводника, создает механические усилия, деформирующие эластомер. Эти деформации создают фазовый рельеф, модулирующий оптическое излучение при считывании.

Созданы также устройства на основе термопластика, который деформируется в соответствии с зарядовым рельефом, повторяющим освещенность фотопроводника, при нагревании его импульсом тока. Определенные успехи достигнуты в применении для модуляции света жидких кристаллов, и это направление быстро прогрессирует.

В заключение отметим, что высокая разрешающая способность элементов и их технические особенности позволяют заключить, что оптически управляемые транспаранты являются тем мостиком, который соединяет две концепции компенсации фазовых возмущений: систем с адаптивным зеркалом и систем обращения волнового фронта в нелинейных средах.

2.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ АДАПТИВНЫХ ЗЕРКАЛ

Получение оптической поверхности на сравнительно тонком оптическом блоке является сложной технической задачей. При давлении инструмента на поверхность недостаточно жесткого блока наблюдаются искажения формы в областях между опорами и на незакрепленных краях с пространственной частотой, обратной расстоянию между толкателями. Естественно, такие искажения формы в дальнейшем затруднительно компенсировать с помощью перемещения поверхности приводами. С другой стороны, увеличение жесткости оптического блока приводит к уменьшению амплитуды перемещений и локальных наклонх поверхности. Высказанные соображения указывают на наличие оптимума толщины оптического блока при определенном шаге между приводами и их жесткости.

Очевидно, формирование оптической поверхности можно осуществлять на различных этапах изготовления адаптивного зеркала. Во-первых, это может быть последняя операция на собранном уже зеркале, а во-вторых, — отдельная обработка зеркального блока, причем при обработке его можно закрепить как по всей тыльной поверхности, так и на толкателях.

Ясно также и то, что чем ближе к конечным операциям изготовления зеркала стоит формирование оптической поверхности, тем меньше искажений будет внесено при дальнейших технологических переходах. Если сборка адаптивного зеркала осуществляется после формообразования поверхности, то впоследствии требуется юстировка оптической поверхности зеркала.

При полировании поверхности закрепленного на толкателях зеркального блока происходит «проявление» толкателей на оптической поверхности. При этом характерные местные ошибки составляют $\pm 0,3$ мкм. Во время изготовления блок закрепляется на план-шайбе посредством толкателей. На интерферограмме видна структура и характер ошибок формы поверхности, связанные с недостаточной жесткостью зеркального блока на незакрепленных участках. Последующая юстировка поверхности позволяет сильно уменьшить ошибки формы.

Для повышения качества оптической поверхности применяют алмазное точение. В [20] приведены результаты изготовления кольцевого плоского адаптив-

ного зеркала. Обрабатываемый блок представляет собой кольцевую алюминиевую пластину (сплав марки 6061—Т651) толщиной 4,8 мм с внешним и внутренним диаметрами 203 и 89 мм соответственно. По двум концентрическим окружностям равномерно размещены 24 толкателя. Алмазное точение произведено на станке фирмы Pneumo Precision (США) при незакрепленных кромках блока со скоростью подачи 2 мм/мин.

Интерферометрический контроль поверхности показывает, что на форму поверхности влияет примерно с двухминутным запаздыванием изменение температуры окружающей среды.

Тепловая изоляция заготовки в термостатированном боксе позволяет существенно уменьшить ошибку изготовления. При стабильном температурном режиме (колебания не более $0,1^{\circ}\text{C}$) ошибка поверхности составляет $\pm 0,127$ мкм за один проход. Шероховатость поверхности — 0,0508 мкм. Достигнутая в результате обработки точность изготовления — 0,305 мкм.

После обработки зеркало собирается и юстируется с помощью 24 дифференциальных винтов. При этом ошибка формы снижается до 0,076 мкм. Авторы работы [20] делают вывод о перспективности алмазного точения для изготовления адаптивных зеркал.

В биморфных пьезокерамических зеркалах в качестве подложек могут быть использованы как стекло, так и металлы. Приклеивание подложки к пьезопластине следует производить клеем, не дающим усадки. После соединения пластины и подложки оптическую поверхность получают традиционными способами.

Технология изготовления мембранных зеркал фирмой Perkin-Elmer (США) описывается в [4]. Мембрана размером до 150 мм изготавливается из титана, никеля, бериллия или молибдена напылением металла в вакуумной камере на основу из CaF_2 . Полученную пленку натягивают на жесткую кольцевую оправу и закрепляют. Известны технологические разработки отечественных пленочных металлизированных зеркал, радиус кривизны которых регулируется давлением среды под пленкой. В этом случае используется нанесение зеркального слоя алюминия на пленку из полиэтилентерефталата толщиной 25 мкм и размером до 150 мм.

Говоря о технологических особенностях формообразования поверхности адаптивных зеркал, нельзя не отметить перспективность применения адаптивных принципов формообразования. Суть этих принципов сводится к оперативному контролю обрабатываемой поверхности и последующему воздействию на ее некондиционные участки. Процедура аналогична фазовому сопряжению с той лишь разницей, что форма поверхности зеркала формируется обрабатывающим инструментом. Примером реализации указанных принципов может служить система с фотоэлектрическим интерферометром, предназначенная для проведения оперативного контроля крупногабаритных оптических деталей непосредственно в процессе изготовления. Информация о фазовом распределении в отраженном от контролируемой детали пучке поступает в микроЭВМ. Пакет прикладных программ позволяет производить считывание, корректировку исходных данных, анализ интерференционной картины. Полученная в результате расчетов топограмма поверхности позволяет оператору принять решение о продолжении ее обработки. Аналогичную задачу выполняет автоматизированная система контроля волнового фронта, использующая для ввода в микроЭВМ телевизионный канал.

ДАТЧИКИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

3.1. ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

Датчик волнового фронта является одним из главных элементов адаптивной оптической системы и по сложности зачастую не уступает адаптивному зеркалу. Принцип действия датчика волнового фронта, как правило, основан на традиционных для оптики методах измерений — интерферометрии, геометрикооптических измерениях — или на заимствованных из радиотехники — гетеродинировании, фазовом детектировании и т. п.

Интерферометрия — одно из наиболее разработанных направлений прикладной оптики. Интерференционная картина, получающаяся в результате сложения двух пучков, позволяет анализом расположения светлых и темных полос, которые образуются при сложении лучей соответственно в фазе и противофазе, определить фазовое распределение в пучке. Специфика адаптивной оптики требует, чтобы детектирование и обработка результатов были проведены в реальном масштабе времени, поэтому ряд известных интерферометров в адаптивной оптике не применяется. По-видимому, большинство проблем будет снято, когда будут решены задачи скоростного считывания изображений с высоким пространственным разрешением, быстрого ввода и обработки больших информационных массивов в ЭВМ.

Наибольшую известность в адаптивной оптике приобрел интерферометр сдвига. Схема интерферометра, примененного Дж. Харди в системе коррекции турбулентности при наблюдении небесных тел RTAC (Real-time Atmospheric Compensation), представлена на рис. 30. Светоделитель делит анализируемый пучок на два. В одном плече осуществляется поперечный сдвиг пучка в направлении оси OX , а в другом — в направлении OY . В каждом из плеч интерференционная картина образуется в результате сложения сдвинутых пучков и проецируется на матрицу приемников. Сдвиг производится дифракционными решетками, установленными в фокальных плоскостях. Дифракционные решетки расщепляют пада-

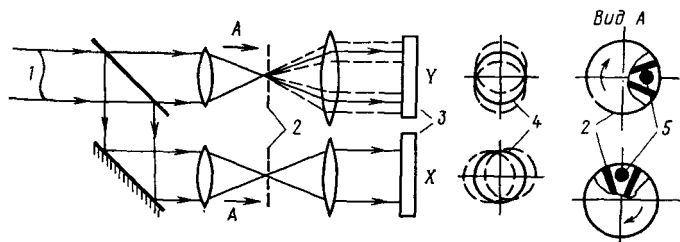


Рис. 30. Схема интерферометра поперечного сдвига:

1 — излучение; 2 — радиальные дифракционные решетки; 3 — матрицы приемников; 4 — сдвиговые интерференционные картины; 5 — положение перетяжки пучка относительно оси вращения

ющий на них пучок (порядки 0, +1, —1 и т. д.), как показано на рис. 30. Они имеют вид радиальных решеток (решетки Ронки) и выполнены из круглых пластин с чередующимися прозрачными и непрозрачными секторами. При одинаковой ширине прозрачных и непрозрачных полос четные дифракционные порядки отсутствуют. Решетки вращаются вокруг оси симметрии, что вызывает модуляцию освещенности интерференционной картины. Частота модуляции равна произведению частоты вращения и числа полос на решетке. Интенсивность на матрице приемников пропорциональна зависимости $0,5 + (2\gamma/\pi) \cos[\omega t + \varphi(x)]$ (по осям OX , OY зависимость аналогична), где ω , γ — частота и глубина модуляции соответственно; $\varphi(x)$ — фаза переменного сигнала.

Деформации волнового фронта анализируемого пучка отображаются на матрице приемников так, что каждый участок деформаций соответствует определенному приемнику. Выделенные электронными средствами значения $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$ связаны с наклоном волнового фронта по отношению к осям OX и OY в точке (x, y) : $\varphi(x) \sim \partial S / \partial x$, $\varphi(y) \sim \partial S / \partial y$. Зная наклоны в точках расположения приемников (x, y) , можно восстановить весь профиль анализируемого волнового фронта.

Так как фаза $\varphi(x)$ пропорциональна наклону волнового фронта и не зависит от длины волны излучения (на самом деле это справедливо при небольших (до 10%) относительных поперечных сдвигах), интерферометр сдвига с успехом применяется для коррекции изображений немонахроматических объектов в астрономических оптических приборах. Величина сдвига легко регулируется изменением расстояния между центрами пучка и решетки.

Интерферометр сдвига, обладая высокой чувствительностью, позволяет работать со сравнительно слабо светящимися объектами — квантовая эффективность его приемной системы может быть доведена до 80%.

Известны интерферометры сдвига с двухчастотными решетками, имеющими перпендикулярные системы штрихов с отличающимся шагом. Модуляция в этих интерферометрах достигается с помощью поступательного перемещения решетки.

Другим способом образования интерференционной картины в адаптивной оптике может служить создание второго (опорного) пучка из небольшого участка анализируемого (предметного) пучка и сложение обоих пучков. Это может быть интерферометр радиального сдвига (рис. 31) с возвратно-поступательным движением уголкового отражателя для создания модуляции или, например, интерферометр с дифракцией на точечном отверстии. Такие интерферометры эффективны только для монахроматических световых пучков.

Опорный пучок в интерферометре с дифракцией на точечном отверстии представляет собой сферическую волну, которая преобразуется объективом в плоскую (коллимированный пучок) и складывается с предметным пучком в плоскости размещения приемников. Модуляция интенсивности достигается введением поляриза-

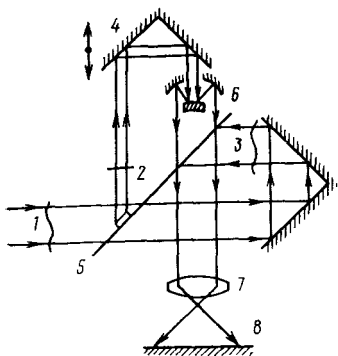


Рис. 31. Схема интерферометра радиального сдвига:

1 — излучение; 2, 3 — интерферирующие пучки с радиальным сдвигом; 4 — уголкового отражатель, совершающий возвратно-поступательное движение; 5 — светоделитель; 6 — расширяющий телескоп; 7 — объектив; 8 — экран

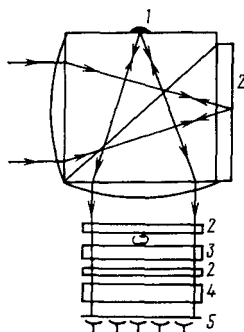


Рис. 32. Схема интерферометра с отражающим пятном:

1 — отражающее пятно; 2 — четвертьволновые пластинки; 3 — вращающаяся полуволновая пластинка; 4 — поляризатор; 5 — матрица приемников

ционных приспособлений. Для этого предметный пучок проходит через линейный поляризатор и кристаллическую четвертьволновую пластину, приобретая круговую поляризацию. Аналогично круговую поляризацию приобретает опорный пучок. С помощью полуволновой кристаллической пластинки добиваются противоположного вращения векторов поляризации предметного и опорного пучков. При сложении получается линейно поляризованный свет, направление поляризации которого зависит от сдвига фаз данных пучков. Вращающаяся перед матрицей приемников полуволновая пластинка создает движущуюся интерференционную картину, что позволяет электронными средствами определить разность фаз в точках размещения приемников.

Аналогичный принцип положен в основу интерферометра на базе делительного куба (рис. 32). В отличие от интерферометра с дифракцией на отверстии, этот интерферометр не столь чувствителен к малым вариациям угла прихода анализируемого пучка. Интерферометр создан в Аризонском университете (США) и является аналогом интерферометра Мерти, применяемого для контроля оптических деталей. Интерферометр выполнен в виде делительного куба с отражающим пятном на одной из граней и четвертьволновой пластинкой на другой.

Недостатком интерферометров с выделением точечного опорного источника является низкая оптическая эффективность прибора, которая не позволяет использовать его при слабых световых сигналах.

Сложение на приемном устройстве принятого сигнала с опорным, сдвинутым по частоте, известно как гетеродинное детектирование. Гетеродинные датчики волнового фронта являются, по существу, разновидностью интерферометров и основываются на гетеродинной интерферометрии. В качестве примера гетеродинного

датчика можно привести датчик волнового фронта, разработанный фирмой Ecole Polytechnique (Франция) (рис. 33). Опорный пучок имеет частоту, отличную от частоты анализируемого пучка. Сдвиг частот лежит в акустическом диапазоне. Электрические сигналы акустических частот поступают на фазовые компараторы. Полезный эффект гетеродинирования здесь заключается не столько в повышении отношения сигнал-шум, сколько в возможности прямого измерения оптической фазы в реальном масштабе времени. Если искаженный волновой фронт поступает от подсвечиваемой цели, то его частота может варьироваться из-за доплеровского смещения при ее движении. В этом случае для постоянства частоты биений используется подстройка частоты.

Определенные затруднения в гетеродинном датчике вызывает получение опорного оптического сигнала (в особенности при анализе излучения, отраженного от удаленной цели). Это связано с тем, что для наблюдения интерференционной картины с применением местного гетеродина требуются источники света с высокой монохроматичностью. В противном случае модуляция частотой потеряется в биениях спектральных компонент гетеродина и анализируемого сигнала. Так, при сдвиге частот 1 МГц длина продольной когерентности гетеродина должна составлять около 300 м. Поэтому нередко в качестве опорного сигнала используют часть анализируемого пучка.

Знакомство с представленными выше устройствами позволяет нам выделить следующие способы сдвига частоты: движущийся отражатель (зеркало, цель, призма и т. п.); движущаяся дифрак-

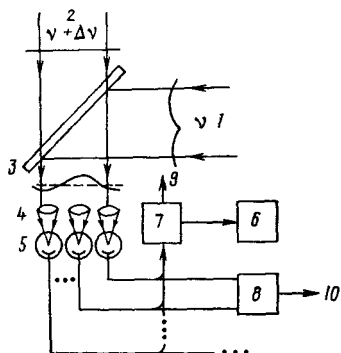


Рис. 33. Схема гетеродинного датчика волнового фронта:

1 — анализируемый пучок; 2 — опорный пучок; 3 — светоделиитель; 4 — оптическая система приемного устройства; 5 — матрица приемников; 6 — опорный генератор; 7 — частотная следящая система; 8 — фазовый компаратор; 9 — электрический сигнал, управляющий гетеродином; 10 — выход на блок обработки и управления фазой

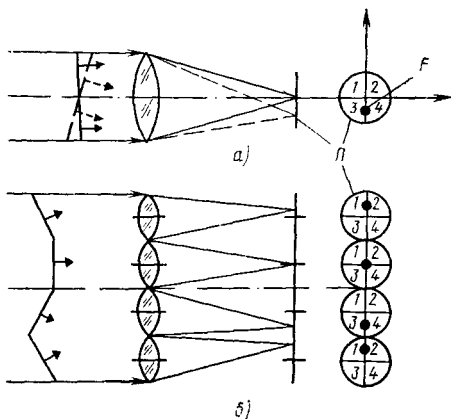


Рис. 34. Схема датчика Гартмана:

а — измерение общего наклона волнового фронта; б — измерение формы волнового фронта

ционная решетка; акустическая (брэгговская) решетка; вращающаяся полуволновая пластинка; неподвижная и вращающаяся; четвертьволновые пластинки на двойном проходе туда-обратно (с возвращающим зеркалом).

Оптическое гетеродинирование предъявляет довольно жесткие требования к точности размещения оптических элементов в гетеродинном приемнике. Так, рассогласование углов прихода опорной и предметной волн должно удовлетворять условию $\theta < 0,7\lambda/d$, где d — размер приемной площадки детектора. Это ограничение (типичное значение $\theta \approx 10^{-4}$ рад) фактически определяет ширину диаграммы направленности гетеродинного датчика.

3.2. ДАТЧИКИ ГАРТМАНОВСКОГО ТИПА

Принцип определения волнового фронта с помощью датчика Гартмана чрезвычайно прост (рис. 34). Весь пучок или его часть (парциальный пучок) фокусируется на квадрантный приемник Π . Так называются координаточувствительные приемники, площадка которых разделена на квадранты — четыре отдельных приемника (1—4). Если фокальное пятно F попадает в центр приемника, равномерно освещая все квадранты, то на выходе приемника наблюдается дифференциальный нулевой сигнал. При смещении пятна возникает разностный сигнал. По разности сигналов от отдельных квадрантов определяются амплитуда и направление смещения. Отсюда с учетом известного фокусного расстояния системы легко определить наклон волнового фронта на данном участке сечения пучка. Локальные наклоны позволяют с помощью быстродействующих ЭВМ восстановить общий профиль волнового фронта.

На рис. 35 представлено устройство простейшего фотодиодного квадрантного приемника. Пластина из полупроводника с p — n -переходом делится на четыре части, расстояние между которыми при необходимости может составлять не более 10 мкм. Изготавливаются приемники с площадками от 1×1 до 10×10 мм² с вольт-ваттной чувствительностью 0,1 ... 0,5 В/(Вт·мм) и постоянной времени 10^{-4} ... 10^{-6} с.

В ИК-диапазоне применяются охлаждаемые жидким азотом фотодетекторы из HgCdTe с эквивалентной мощностью шума 10^{-19} Вт/Гц и полосой пропускания до 1,5 ГГц.

Перспективным представляется использование пьезоэлектрических приемников, работающих в широкой области оптического

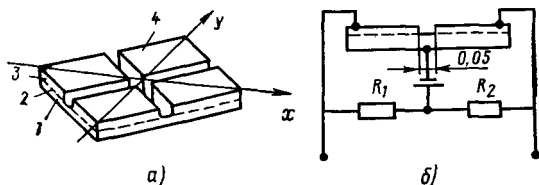


Рис. 35. Устройство (а) и схема включения (б) квадрантного фотодиода:

1 — кристаллодержатель; 2 — материал n -типа; 3 — p -область; 4 — прозрачные для излучения контакты

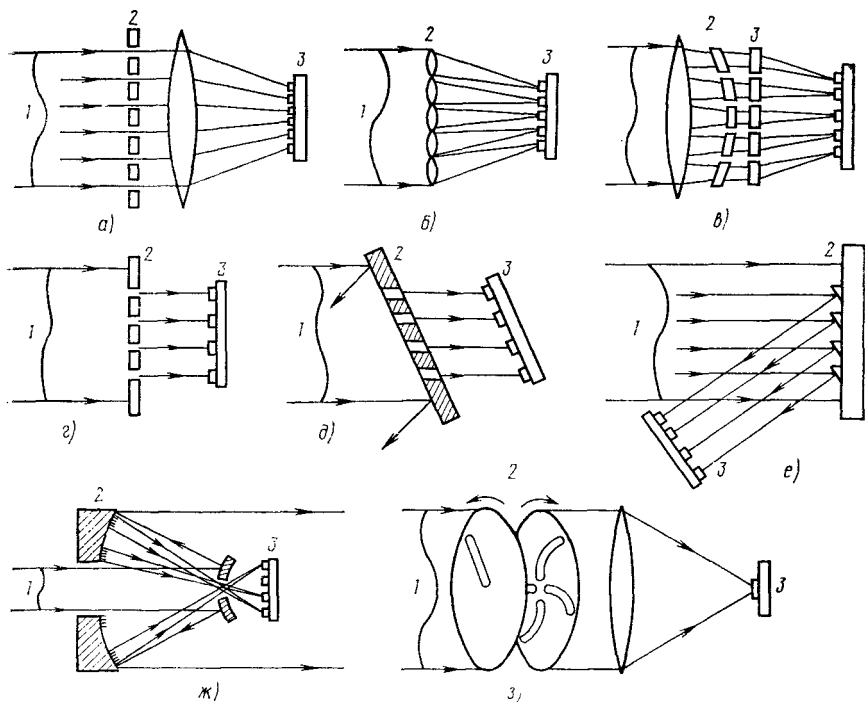


Рис. 36. Варианты исполнения оптической части датчиков гартмановского типа. 1 — излучение; 2 — система разделения излучения на парциальные волновые фронты; 3 — приемники излучения

диапазона при регистрации модулированного или импульсного излучения и не требующих системы охлаждения.

Известны различные модификации гартмановских датчиков. Для получения гартманогаммы, т. е. картины смещения парциальных пучков, могут быть использованы следующие способы и устройства (рис. 36):

использование тонкой непрозрачной пластины с малыми отверстиями — в этом случае распределение интенсивности света на приемнике вследствие дифракции идентично распределению в фокальном пятне (а—г);

установка поворотного зеркала с отверстиями, расположенными под углом к его отражающей поверхности (д);

сканирование пучка одним отверстием, свет от которого проходит через линзу и фокусируется на одном квадрантном приемнике (з);

использование вместо отверстий малых отражателей, формирующих гартманогамму (е);

нанесение на рабочее зеркало в виде пятен множества ответвляющих дифракционных решеток (ж).

Детектирование гартманограммы может производиться не только с помощью квадрантных приемников. Допускается анализ сразу всей картины с помощью телевизионной камеры с последующей обработкой изображения методами распознавания образов.

К датчикам гартмановского типа относится так называемый I^3 -датчик (Integrated Imaging Irradiance), который предназначен для работы со слабыми оптическими сигналами. Идея построения этого датчика заключается в том, что на датчик Гартмана вместе с анализируемым пучком направляют опорный пучок с плоским волновым фронтом. На квадрантный приемник, таким образом, попадают два пятна, относительное расположение которых позволяет определить изменение наклона парциального пучка. Для повышения отношения сигнал-шум с помощью одновременного конического вращения основного и опорного пучков добиваются вращения двух пятен в пределах квадрантного приемника, что и позволяет более эффективно задействовать площадь приемника (рис. 37).

Радиус траектории, по которой движутся пятна, выбирается в пределах $0 \dots \sqrt{2}l$, где l — размер пятна. Частота вращения — $0,02 \dots 20$ кГц. Разностный сигнал интегрируется аналоговой ячейкой и после преобразования поступает в процессор.

Такая схема позволяет получать среднеквадратичные ошибки волнового фронта в реальном масштабе времени, близкие к расчетным: $\sigma \approx \pi/(S/N)$, где S/N — отношение сигнал-шум.

Построенные исходя из геометрических соображений датчики гартмановского типа малочувствительны к вариациям длины волны и так же, как интерферометры поперечного сдвига, могут работать в белом свете. В отличие от интерферометров датчик Гартмана менее чувствителен к вибрациям. Он может работать также с импульсным излучением, что довольно трудно реализовать в интерферометрах.

Однако кажущаяся простота устройства на практике оборачивается серьезными проблемами, связанными с юстировкой большого числа элементов. Поэтому в последнее время появились системы с гибридными датчиками, которые определяют общий наклон волнового фронта с помощью гартмановского датчика, а более сложные возмущения — с помощью интерферометра [10]. Пример такой системы мы рассматривали в § 1.3.

В большинстве систем для анализа волнового фронта требуется ответить часть мощности оптического сигнала, причем так, чтобы ответвленный пучок был копией основного. Для этого в адаптивной оптике, как правило, используются светоделительные устройства. В простейшем случае это могут быть по-

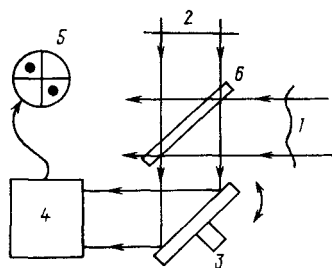


Рис. 37. Схема I^3 -датчика: 1 — анализируемый пучок; 2 — опорный пучок; 3 — вращающееся зеркало с наклоном по осям OX , OY ; 4 — датчик Гартмана; 5 — световые пятна на квадрантном приемнике; 6 — светоделитель

лупрозрачные зеркала, делительные кубы и т. д. Современные системы, однако, требуют применения элементов ответвления отражательного типа на основе нанесенных на зеркало дифракционных решеток. Цель таких элементов — ответвление малой части световой мощности монохроматического излучения или разделение приходящего от цели отраженного излучения и выходного пучка.

Ответвляющая дифракционная решетка может быть установлена в любом нужном месте адаптивной оптической системы.

При коллимированном пучке линейная решетка используется для отвода части мощности в датчик волнового фронта или для введения в тракт системы юстировочного излучения. Целесообразно применять схему с двумя решетками так как излучение реальных источников не является строго монохроматическим и такая схема позволяет компенсировать эффекты дисперсии на решетке.

Число приемных элементов K в гартмановских датчиках и интерферометрах должно быть порядка $(D/r_0)^2$, где D — размер апертуры; r_0 — радиус когерентности атмосферы, иначе точность восстановления волнового фронта будет недостаточной для компенсации возмущений. Более строгий анализ дает число элементов

$$K \approx \frac{\Omega}{\pi} \left(\frac{4}{\pi l_s} \right)^2 \ln \frac{\sigma_s}{\sigma},$$

где Ω — площадь апертуры; σ_s , l_s — среднеквадратичная амплитуда и масштаб возмущений соответственно; σ — ошибка аппроксимации фазы.

Например, для компенсации возмущений с масштабом $l_s = 3$ см с относительной точностью $\sigma/\sigma_s = 10^{-2}$ на апертуре диаметром 0,5 м требуется разместить до 460 элементов.

Обратимся к вопросу восстановления волнового фронта из наклонов парциальных пучков в точках размещения приемных элементов. Эта задача представляет интерес как для гартмановских датчиков, так и для датчиков на основе интерферометра поперечного сдвига. Простейший алгоритм восстановления заключается в следующем. Пусть известны углы наклонов по осям OX и OY на i , j -м элементе матрицы датчиков θ_{xij} , θ_{yij} . Тогда измеренные разности фаз между элементами $S_{xij} = 2\pi l_0 \theta_{xij} / \lambda$, $S_{yij} = 2\pi l_0 \theta_{yij} / \lambda$ имеют, например, следующие оценки, связанные со значениями фаз S_{ij} (l_0 — расстояние между узлами измерительной сетки):

$$\tilde{S}_{xij} = \frac{1}{2} (S_{ij} + S_{i, j+1} - S_{i+1, j} - S_{i+1, j+1}),$$

$$\tilde{S}_{yij} = \frac{1}{2} (S_{ij} + S_{i+1, j} - S_{i, j+1} - S_{i+1, j+1}).$$

При $K > 9$ система уравнений переопределена, а при наличии ошибок измерений (шумов) несовместна. Остановимся на простейшем случае, когда шумами можно пренебречь. Оценки фазы находятся из уравнений минимизации среднего квадрата отклонений между S_{xij} , S_{yij} и $\tilde{S}_{xij}$, $\tilde{S}_{yij}$:

$$S_{ij} = \frac{1}{4} (S_{i-1, j-1} + S_{i-1, j+1} + S_{i+1, j-1} + S_{i+1, j+1}) + \\ + \frac{1}{4} (S_{x, i-1, j+1} - S_{x, i+1, j+1} + S_{x, i-1, j-1} - S_{x, i+1, j-1}) +$$

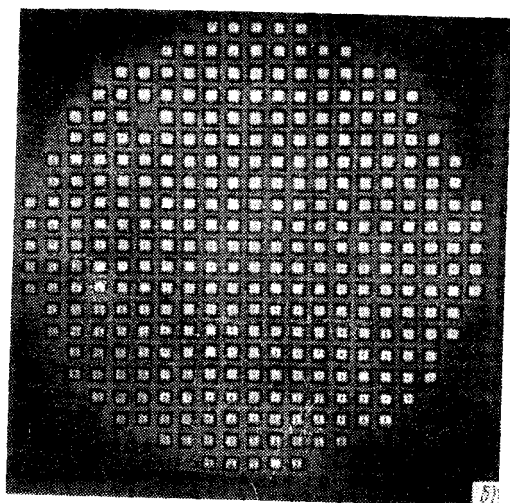
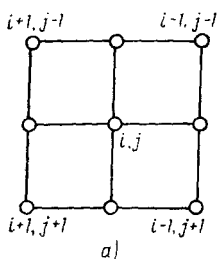


Рис. 38. Вариант размещения приемников в датчике волнового фронта:
а — схема размещения; б — гартманограмма

$$+ \frac{1}{4} (S_{y, i+1, j-1} - S_{y, i+1, j+1} + S_{y, i-1, j-1} - S_{y, i-1, j+1}).$$

Физический смысл полученных уравнений становится прозрачным, если обратиться к рис. 38. Легко видеть, что фаза S_{ij} равна среднему арифметическому из фаз в точках, расположенных по краям окаямляющего четырехугольника, плюс среднее арифметическое из соответствующих измеренных разностей фаз по осям OX и OY .

Решение системы уравнений проводится с помощью аналоговой или цифровой техники. В системе РТАС, например, алгоритм восстановления реализуется сравнительно простой электрической цепью из сопротивлений и операционных усилителей. Время срабатывания такой цепи при $K=21$ составляет 50 мкс.

Известны более сложные алгоритмы восстановления, оптимизированные по различным критериям с целью снижения ошибки при наличии шумов, реальных условий работы и т. п.

3.3. ФАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

В отличие от систем фазового сопряжения, системы апертурного зондирования, осуществляя компенсацию возмущений, производят как бы косвенные измерения фазы. Таким образом, датчиком волнового фронта системы апертурного зондирования можно считать самонастраивающуюся систему, обеспечивающую достижение экстремального значения используемого показателя качества.

Основой систем апертурного зондирования является нелинейное звено. Наибольшую известность имеют системы с гармоническим поисковым сигналом, в которых для выявления фазового сдвига используется фазовый дискриминатор (синхронный детектор).

Схема управления объектом с применением синхронного детектора представлена на рис. 39. Синхронный детектор, обозначенный штриховой рамкой, состоит из множительного звена и фильтра низких частот, усредняющего во времени произведение с выхода множительного звена. Поисковый сигнал формируется генератором синусоидальных колебаний.

Если выходной сигнал, описывающий состояние объекта, имеет экстремум, то положение системы относительно экстремума характеризует фаза выходного сигнала S (рис. 40). Для адаптивной оптической системы физической величиной выходного сигнала является, например, интенсивность света I в точке фокусировки. Сообщаемая входному сигналу частота (колебания поверхности зеркала) вызывает модуляцию на этой же частоте выходного сигнала (интенсивности). Из рис. 40 видно, что в случае, когда система находится слева от экстремума, колебания интенсивности совпадают по фазе с поисковым сигналом, а справа — имеют противоположную фазу. Амплитуда этих колебаний пропорциональна крутизне характеристики. В точке экстремума колебания выходного сигнала почти исчезают. Действительно, они становятся очень малыми по амплитуде и, кроме того, имеют удвоенную частоту, которая в системе отфильтровывается. Таким образом, получение сдвига фаз между выходным и входным сигналами в синхронном детекторе дает информацию о знаке и величине шага на пути к экстремуму.

Замечательным свойством таких систем является реакция не на абсолютное значение показателя качества (интенсивность), а на положение относительно максимума, так как рабочий сигнал пропорционален производной $\partial I / \partial S$. Условия освещения цели, например, могут изменяться — сказывается поглощение света или изменение коэффициента отражения. Система при этом будет упорно «ползти» к максимуму, отвечающему данным условиям.

Мы рассмотрели упрощенную процедуру действия самонастраивающейся системы апертурного зондирования на основе синхронного детектирования. Процессы, проходящие в системе, значительно сложнее. Так, на самом деле рабочий сигнал оказывается пря-

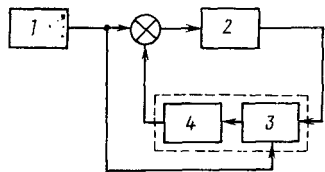


Рис. 39. Схема управления с применением синхронного детектора:

1 — генератор синусоидальных колебаний; 2 — объект управления; 3 — множительное звено; 4 — фильтр низких частот

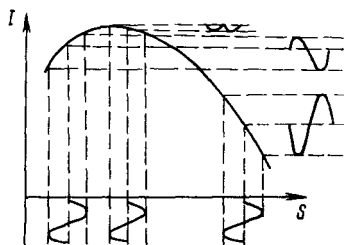


Рис. 40. Отклик выходного сигнала в системе управления на воздействие синусоидальных колебаний

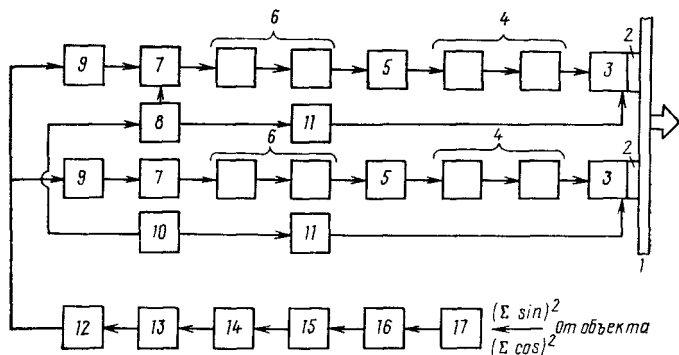


Рис. 41. Структурная схема системы управления с многоканальной синус-косинусной фазовой модуляцией (показана соответствующая пара каналов): 1 — зеркало; 2 — модулирующая часть привода; 3 — корректирующая часть привода; 4 — усилитель (коэффициент усиления $K \approx 40$, ширина полосы ~ 200 Гц); 5 — интегратор с постоянной времени $\tau \approx 5$ мс; 6 — многокаскадный фильтр низких частот из фильтров 2-го порядка с частотой среза ~ 200 Гц; 7 — синхронный детектор ($K=1$); 8 — фазосдвигающее (на $\pi/2$) устройство; 9 — фазовый корректор ($\pi/9 \dots \pi, K=1$); 10 — генератор модулирующего сигнала (спектр частот $0.5 \dots 5$ кГц; напряжение выхода ~ 5 В); 11 — усилитель модуляции ($K=40$, спектр частот $0.5 \dots 5$ кГц); 12 — усилитель-ограничитель (напряжение до 5 В); 13 — фильтр высоких частот (частота среза 50 кГц); 14 — фильтр низких частот (частота среза 100 Гц); 15 — автоматическая регулировка усиления; 16 — предварительный усилитель; 17 — фотоприемник

мо пропорциональным фазе оптического сигнала только при малых фазовых возмущениях. Поэтому система при большой амплитуде фазовых возмущений (характерные значения больше 3π) может потерять устойчивость.

Многоканальные системы содержат синхронный детектор и генератор колебаний в каждом канале. Зависимость $I(S)$ представляет собой сложную поверхность в пространстве N измерений. В процессе работы система двигается к ее вершине.

Работа осложняется наличием локальных экстремумов или точек перегиба, задерживающих систему в $2N\pi$ -состояниях (см. § 1.4).

Тем не менее адаптивные оптические системы с датчиком на основе синхронных детекторов хорошо показывают себя при компенсации фазовых возмущений в натурных экспериментах.

На рис. 41 представлена структурная схема реальной системы апертурного зондирования [13]. В системе используется синус-косинусная модуляция (см. § 1.3) для каждой показанной пары каналов, что позволяет примерно вдвое сократить ширину полосы модуляции.

В некоторых случаях легко выделить автоматическую коррекцию наклона или фокусировки луча. Это целесообразно, например, при наличии вибраций в системе, компенсации атмосферной турбулентности, быстром перемещении цели и т. п. Для этого организуют отдельные каналы синхронного детектирования для зеркала (или двух зеркал), управляющего направлением луча, и зеркала в телескопе, изменяющего фокусное расстояние. Каждое из зеркал совершает малые колебательные движения на определенной (сво-

ей) частоте, так что синхронный детектор выделяет сигнал управления, «ответственный» только за наклон или фокусное расстояние. Более сложные возмущения корректируются адаптивным зеркалом, которое имеет свой спектр частот «окраски» каналов.

Кроме использования последовательной или параллельной (на различных частотах) модуляции в каналах, системы апертурного зондирования строятся на основе методов оценки функции резкости изображения. Часто системы, работающие по функции резкости, называют системами без датчика волнового фронта. Тем не менее ввиду важности для адаптивной оптики этот псевдодатчик нельзя обойти вниманием. Идейно он аналогичен системам с фазовым детектором — в волновой фронт также вносятся пробные возмущения. Однако есть и существенное отличие — эти возмущения не носят характер дополнительного поискового гармонического сигнала. В этом случае осуществляется шаговый поиск экстремума.

Для оценки состояния системы используется функция резкости изображения. Оказывается, если сформировать изображение источника света, установив в фокальной плоскости матрицу приемников, и вычислить сумму квадратов интенсивностей на каждом приемнике, то можно гарантировать устранение возмущений при условии, что эта сумма принимает свое максимальное значение. Добиваясь максимума суммы путем перебора различных положений адаптивного зеркала (современные методы оптимизации и вычислительная техника позволяют это сделать очень быстро), можно быть уверенным, что получено неискаженное изображение.

Математически функция резкости, а более точно — функционал, имеет вид (см. табл. 1)

$$J_1 = \int I^2(\rho) d^2\rho,$$

где $I(\rho)$ — распределение интенсивности в фокальной плоскости.

Интегрирование ведется по всей плоскости.

Указанная выше взаимная связь между максимумом J_1 и полной компенсацией искажений установлена Ф. Дайсоном в 1975 г. Аналогичная теорема справедлива и для любой функции $I^p(\rho)$, $p > 2$.

Можно указать и другие функционалы, максимизация которых соотвествует устранению фазовых возмущений. К ним относится, в частности, функционал

$$J_2 = \int_{\Delta} I(\rho) d^2\rho$$

(интегрирование ведется по малой площадке Δ в фокусе системы; технически используется всего один приемник). В более общем виде этот функционал записывается так:

$$J_2 = \int M(\rho) I(\rho) d^2\rho,$$

где $M(\rho)$ — функция прозрачности маски, накладываемой на изображение.

Если известны неискаженные изображения объектов, заданные распределением интенсивности $I_0(\rho)$, то для компенсации могут быть использованы функционалы

$$J_3 = \int I(\rho) I_0(\rho) d^2\rho; \quad J_4 = \int [I(\rho) - I_0(\rho)]^2 d^2\rho.$$

Сравнение указанных функционалов дается в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Характеристики функционалов резкости изображения

Функционал	Наблюдаемый объект	Приемник	Полоса пропускания частот	Чувствительность к общему наклону волнового фронта
J_1	Точечный, протяженный	Матричный	Узкая	Нечувствителен
J_2	Точечный	Одиночный	Широкая	Чувствителен
J_3	Точечный, известный, протяженный	То же	То же	То же
J_4	То же	Матричный	Узкая	»

Более узкая полоса пропускания для функционалов J_1 и J_2 обусловлена необходимостью интегрирования сигналов на матрице фотоприемников. Это время может занимать интервал 0,4... 4 мс.

На рис. 42 представлена простейшая схема реализации метода повышения функции резкости изображения — схема максимизации нормированной разности интенсивностей $(I'_1 - I'_2)/(I'_1 + I'_2)$, где I'_1 — интенсивность в фокусе системы; I'_2 — общая интенсивность вне фокуса. Свет фокусируется на точечной диафрагме и попадает на установленный за ним фотоприемник. Оставшаяся часть светового потока зеркально отражается на другой приемник. Затем сигналы I'_1 и I'_2 с этих приемников вычитаются, складываются и делятся, в результате чего на выходе получается нормированная разность. Если в анализируемый волновой фронт внести фазовое возмущение (адаптивным зеркалом), то нормированная разность изменится. Блок управления сопоставит полученное значение с предыдущим и сделает очередной шаг, изменяющий форму поверхности адаптивного зеркала.

Примером осуществления компенсации атмосферной турбулентности с использованием функции резкости являются эксперименты, проведенные на Лейшнеровской и Ликской обсерваториях (США) при наблюдении звезд. В результате получено изображение звезды с полушириной 0,6", в отличие от изображения без компенсации 4... 5". Данный результат можно по достоинству оце-

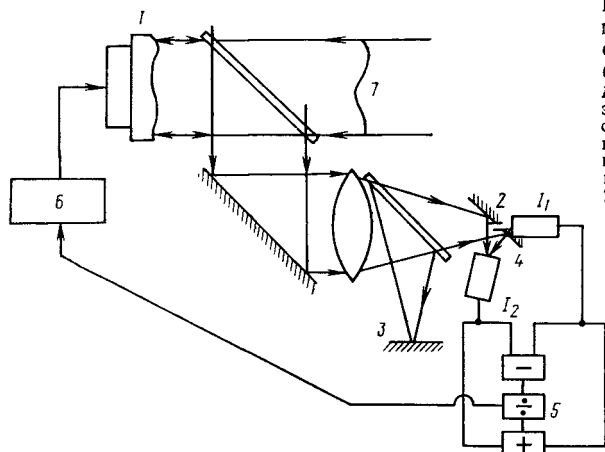


Рис. 42. Схема реализации метода повышения функции резкости изображения:

1 — адаптивное зеркало; 2 — зеркальная маска с отверстием; 3 — экран; 4 — приемник излучения; 5 — блок вычисления функции резкости; 6 — блок управления; 7 — излучение

нить, если учесть, что дифракционный предел разрешения составляет 0,4".

3.4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАТЧИКОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Познакомившись с основными вариантами построения датчиков волнового фронта, можно подвести некоторые итоги. Итак, приступая к разработке датчика для адаптивной оптической системы, необходимо принять во внимание следующие специальные требования:

высокое пространственное разрешение (многоканальность) датчика;

решающее значение быстродействия датчика;

согласование большого динамического диапазона датчика с проблемой фазовой неоднозначности при возмущениях свыше 2π рад;

независимость результатов фазовых измерений от случайных изменений интенсивности света на прismsой апертуре;

чувствительность или эффективность, с которой используется световой поток;

ширина спектра рабочего излучения;

сложность датчика, которая включает рассмотрение надежности, потенциальной стоимости, степени технической проработки и т. п.

Для предварительных оценок тех или иных требований можно воспользоваться приближенными соотношениями.

Для расчета числа каналов датчика

$$N \approx \left(\frac{2D}{\pi l_s} \right)^2 \ln \frac{\sigma_s}{\sigma},$$

где σ/σ_s — относительная ошибка аппроксимации волнового фронта; D/l_s — отношение диаметра апертуры к масштабу неоднородностей.

В общем случае для интерферометров и датчиков гартмановского типа число приемных каналов датчика не обязательно совпадает с числом каналов исполнительного элемента управления волновым фронтом. При гетеродинировании

и синхронном детектировании, как правило, используется равное число каналов датчика и исполнительного элемента. При этом выбор числа каналов N осуществляется исходя из заданной ошибки аппроксимации волнового фронта поверхностью адаптивного зеркала $\sigma_{\text{ст}}$:

$$N \approx 0,3 \left(\frac{D}{l_s} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{\text{ст}}}{\sigma_s} \right)^{-1}.$$

Для колмогоровской модели турбулентности это число может быть выражено через радиус когерентности атмосферы:

$$N \approx 0,3 \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \sigma_{\text{ст}}^{-12/5}.$$

Быстродействие можно оценить исходя из частоты среза замкнутой системы

$$\omega_c \approx \frac{1,4}{\tau_s} \frac{\sigma_s}{\sigma},$$

где τ_s — характерное время «жизни» неоднородности.

При небольшой амплитуде фазовых возмущений (на линейном участке дискриминационной характеристики) характерное время срабатывания системы $t \approx \pi/\omega_c$. Отсюда, зная временные параметры привода адаптивного зеркала, для данного датчика можно определить требуемую постоянную времени.

Что касается фазовой неоднозначности, следует заметить, что большинство систем действует по принципу обнуления фазовой ошибки. Однако эта проблема, как мы видели, может оказаться серьезной для систем апертурного зондирования, во-первых, по причине потенциальных 2π -состояний и, во-вторых, из-за нелинейности дискриминационной характеристики фазового детектора.

Наименьшей чувствительностью к вариациям интенсивности в сечении пучка обладают датчики, использующие частотную модуляцию, — сдвиговые интерферометры, гетеродинные датчики. Датчики гартмановского типа и фазовые детекторы имеют умеренную чувствительность к этим вариациям.

Ошибка датчика волнового фронта зависит от чувствительности детекторов, используемых для приема и преобразования излучения. Таким образом, при слабых сигналах точность датчика ограничена дробовым шумом фотоприемника. Значение ошибки обратно пропорционально квадратному корню из числа фотонов, принятых в течение интервала измерения. Известно, что это число при конечном времени интегрирования детектора равно отношению сигнал-шум. Для прямого детектирования ошибка измерения волнового фронта

$$\Delta S \gtrsim \frac{\pi}{S/N},$$

где S/N — отношение сигнал-шум.

Уравнение справедливо для датчиков гартмановского типа. Для интерферометров ошибка примерно в $\sqrt{2}$ раз больше.

Приведем оценочные формулы отношения сигнал-шум для характерных систем с выходящей волной. Пусть на цели смонтирован уголкового отражателя диаметром d . Система фазового сопряжения с датчиком Гартмана работает со следующим отношением сигнал-шум:

Таблица 4. Характеристики

Характеристика	Интерферометр сдвига	Гетеродинный датчик
Метод	Движущаяся решетка	Гетеродинное выделение фазы
Наблюдаемый параметр	Фазовая модуляция	Фазовая модуляция
Измеряемый параметр	Наклон волнового фронта	Оптическая фаза
Расположение приемника	Плоскость апертуры	Плоскость апертуры
Спектральная полоса	Широкая	Узкая
Оптическая эффективность	Высокая	Высокая
Быстродействие	Высокое	Высокое
Сложность оптической системы	Средняя	Средняя
Число приемников	$2N$	N
Блок электроники	N каналов	N каналов

$$\frac{S}{N} = \frac{D^*}{V A \Delta \nu_c} \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \left(\frac{\Omega_d}{\Omega_0} \right) \alpha P_0,$$

где D^* , A — обнаружительная способность и площадь детектора соответственно; $\Delta \nu_c$ — характерная полоса пропускания частот системы; δ/D — отношение диаметра парциального пучка к общему диаметру пучка; Ω_d/Ω_0 — отношение площади уголкового отражателя к площади светового пятна; α — коэффициент поглощения трассы при проходе туда-обратно; P_0 — мощность источника света.

Для гетеродинного датчика с шириной полосы сигнала $\Delta \nu$

$$\frac{S}{N} = \left(\frac{\alpha P_0 \eta \lambda}{2\pi \hbar c \Delta \nu N} \right)^{1/2} \left(\frac{Dd}{\lambda L} \right)^2,$$

где η — квантовая эффективность приемника; $\hbar$, c — соответственно постоянная Планка и скорость света.

Система апертурного зондирования с N каналами и расстоянием между канальными частотами $\Delta \nu_0$ имеет отношение сигнал-шум для одного канала на начальном этапе адаптации:

$$\frac{S}{N} = \frac{D^*}{V A N \Delta \nu_0} \left(\frac{m}{N} \right) \left(\frac{d^2 D}{d_0 L \lambda} \right)^2 \alpha P_0,$$

где m — относительная глубина модуляции; d_0 — диаметр светового пятна; L — длина трассы.

На конечном этапе адаптации

$$\frac{S}{N} = \frac{D^*}{V A N \Delta \nu_0} \left(\frac{m}{N} \right) \left(\frac{dD}{\lambda L} \right)^4 \alpha P_0$$

(здесь считается, что размеры приемной и передающей апертур равны, в противном случае D^4 заменяется на произведение квадратов их диаметров).

Датчик Гартмана	Параллельное синхронное детектирование	Последовательное синхронное детектирование и максимизация функции резкости
Выделение парциальных пучков	Внесение фазовой модуляции в каналы	Последовательное внесение вариаций фазы
Положение парциального пучка	Модуляция интенсивности	Модуляция интенсивности
Наклон волнового фронта	Интенсивность	Интенсивность
Плоскость апертуры	Плоскость изображения	Плоскость изображения
Широкая	Широкая	Широкая
Высокая	Изменяется как $1/N$	Изменяется как $1/N$
Высокое	То же	То же
Очень сложная	Простая	Простая
$4N$	1	1
N каналов	N каналов	1 канал

Рассматривая датчики волнового фронта, мы отмечали возможность целого ряда датчиков работать в немонохроматическом свете (интерферометр сдвига, датчика Гартмана, системы апертурного зондирования). В частности, это позволяет применять адаптивную оптику в системах с принимаемой волной, например в теплолокации, оптической астрономии и т. д.

Степень сложности создания того или иного датчика определяет его выбор или отклонение для данной разрабатываемой системы. Качественное представление о датчиках дает таблица их основных характеристик (табл. 4).

Глава 4.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМ ЗЕРКАЛОМ

4.1. ПОНЯТИЕ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ АДАПТИВНЫМ ЗЕРКАЛОМ

Задача об организации управления оптическим пучком может быть поставлена очень широко. Основные принципы подхода к ее решению сформулированы в [2]. Они устанавливаются с первого шага формализации задачи — выработки показателей качества, охватывают проблему синтеза системы, в том числе оптимизацию ее звеньев и параметров, определение алгоритмов, по которым производится управление, включая управление, осложненное самоиндуцированными возмущениями и наличием протяженных диффузно отражающих целей, оптимизацию методов, с по-

мощью которых осуществляется управление волновым фронтом по заданным алгоритмам.

В такой постановке оптимизация управления в адаптивной оптике охватывает довольно широкий круг вопросов. Мы же, представляя главным образом техническую сторону адаптивной оптики, рассмотрим один вопрос, который в данном контексте имеет практический интерес.

Обратим внимание на то, что в процессе изложения материала мы уже условились о показателях качества — это может быть интенсивность излучения на удаленной цели, ошибка измерения и коррекции фазы или одна из функций резкости изображения. Более того, мы уже осуществили структурный синтез систем и познакомились с ее основными элементами и их работой, научились определять фазу оптического излучения. В то же время, чтобы мысленно замкнуть цепь обратной связи на адаптивном зеркале, мы должны представлять себе, какую работу выполняет управляющая вычислительная машина для преобразования информации о фазе в сигналы, направляемые в каналы управления приводами адаптивного зеркала. Методы поиска вектора управляющих воздействий на приводы адаптивного зеркала и составляют содержание данной главы. Понятие об этих методах должно, во-первых, удовлетворить наш интерес к процессам, происходящим в цепи обратной связи системы, во-вторых, дать разработчику представление об управляющих алгоритмах и требованиях к универсальной или специальной ЭВМ и, наконец, в-третьих, послужить первой ступенькой для понимания более общей задачи организации управления.

Традиционно адаптивные оптические системы делятся на системы фазового сопряжения и апертурного зондирования. Первые основаны на компенсации возмущений исходя из результатов измерений фазы. Вторые, решая фактически ту же задачу формирования фазосопряженного поля, находят экстремальное значение некоторой величины с помощью создания пробных конфигураций поверхности адаптивного зеркала.

Рассмотрим подробнее процесс формирования поверхности зеркала в фазосопряженных системах. Пусть с помощью датчика волнового фронта известно фазовое распределение излучения $S(\rho)$. Требуется определить значение сигналов U_i , которые необходимо направить на приводы адаптивного зеркала, чтобы скомпенсировать при отражении от зеркала нежелательное $S(\rho)$. В идеале поверхность должна быть такой, чтобы при отражении фазовый набег составил $-S(\rho)$, тогда в результате образуется плоский волновой фронт $S(\rho) - S(\rho) = 0$, или $-2S(\rho)$, тогда образуется уходящая к объекту волна с фазой $S(\rho) - 2S(\rho) = -S(\rho)$, которая, пройдя через среду с искажениями $S(\rho)$, достигнет объекта без искажений. Первый случай характерен для приемных систем, второй — для передающих. Нетрудно понять, что с точки зрения точности формирования поверхности адаптивного зеркала они

практически эквивалентны, поэтому будем рассматривать только один — первый случай.

Реально сформировать поверхность адаптивного зеркала, соответствующую $S(\rho)$, в абсолютном большинстве случаев не удастся. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно, например, попытаться представить себе компенсацию секционированным адаптивным зеркалом возмущения $S(\rho)$, описываемого непрерывной функцией.

Ошибку компенсации при отражении от адаптивного зеркала в общем виде можно представить формулой

$$\Delta S(x, y, t) = S(x, y, t) - \frac{4\pi}{\lambda} \cos \theta \sum_{n=1}^N k' U_n(t) \times \\ \times f\left(\frac{x-x_n}{\cos \theta}, y-y_n\right),$$

где $\rho = \{x, y\}$ — координата точки; $n=1, \dots, N$ — номер привода; θ — угол падения излучения на зеркало; k' — чувствительность привода в составе адаптивного зеркала; U_n — напряжение на n -м приводе; $x_n/\cos \theta, y_n$ — координаты n -го привода; N — число приводов; t — время.

Будем рассматривать для простоты нормальное падение на зеркало $\theta=0$ и введем безразмерные коэффициенты $V_n = 4\pi k' U_n / \lambda$, которые назовем компонентами вектора управляющих воздействий $\mathbf{V} = \{V_1, \dots, V_n, \dots, V_N\}$. Допустим также, что быстродействие системы достаточно высоко, чтобы можно было пренебречь зависимостью от времени. Таким образом, имеем

$$\Delta S(\rho) = S(\rho) - \sum_{n=1}^N V_n f(\rho - \rho_n).$$

Мы получили ошибку, которая обусловлена только геометрическими свойствами поверхности зеркала и определяет статическую ошибку системы. Выбор управляющих воздействий V_n , вообще говоря, можно осуществить по-разному. Например, наиболее просто положить $V_n = S(\rho_n)$, где $S(\rho_n)$ — значение фазы в точке размещения соответствующего привода, т. е. осуществить выбор по текущему значению фазы. Для секционированного зеркала можно в качестве V_n взять среднее по площади n -й субапертуры значение фазы. Однако очевидно, что наилучший выбор V_n связан с минимизацией статической ошибки.

Если статическая ошибка невелика, то интенсивность излучения в фокусе системы пропорциональна величине $e^{-\sigma^2} \approx 1 - \sigma^2$, где σ — среднеквадратичная фазовая ошибка на апертуре зеркала:

$$\sigma = \sqrt{\Delta S^2} = \left(\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \Delta S^2(\rho) d^2 \rho \right)^{1/2}$$

(интегрирование ведется по площади апертуры Ω).

Определяя значения V_n , минимизирующие среднеквадратичное значение статической ошибки, мы тем самым гарантируем

Таким образом, управляющие воздействия, отвечающие оптимальному управлению по критерию среднеквадратичной фазовой ошибки, определяются в результате расчета N двукратных интегралов (сумм) и N^2 операций умножения и сложения.

Возможности упрощения и сокращения операций мы рассмотрим в следующем разделе, а теперь обратимся к системам апертурного зондирования.

Классическая система апертурного зондирования КОАТ с применением многоканальной фазовой модуляции, по существу, является автоматическим оптимизатором, определяющим управляющие воздействия на приводы адаптивного зеркала. Поэтому вопрос об алгоритме достижения экстремума имеет скорее теоретический, нежели прагматический интерес — во всяком случае, для идеальных систем в отсутствие воздействия шумов, фазовых возмущений, превышающих 2π , и т. п.

Заметим только, что данная система реализует градиентный метод поиска экстремума. Если представить себе зависимость показателя качества как поверхность в пространстве $V_1, \dots, V_N$, то координаты оптимальных управляющих воздействий соответствуют вершине этой поверхности. Движение системы из начальной точки к вершине осуществляется в соответствии с величиной и знаком производных показателя качества по $V_1, \dots, V_N$ (более точно по направлению градиента).

Градиентный метод может быть использован для поиска $V_1, \dots, V_N$ в системе максимизации функции резкости изображения. Процедура поиска заключается в последовательном расчете итераций для каждого из V_n ($n=1, \dots, N$):

$$V_n^{(1)} = V_n^{(0)} + \alpha_0 J'_n(V_n^{(0)}, \dots, V_N^{(0)});$$

$$V_n^{(k)} = V_n^{(k-1)} + \alpha_{k-1} J'_n(V_1^{(k-1)}, \dots, V_N^{(k-1)}),$$

где $J'_n(V_1, \dots, V_N)$ — значение производной функции резкости по V_n в точке $V_1, \dots, V_N$; α_j — шаг итерации.

Итеративный процесс считается законченным, когда последующие значения V_n будут отличаться от предыдущих не более чем на заранее установленную величину. Шаг α_j может выбираться различными способами, упрощающими процедуру поиска или ускоряющими ее в ущерб простоте и т. д. Наиболее известен метод наискорейшего спуска (этот метод используется в задаче минимизации функционалов). Идея метода состоит в том, что для каждой $j+1$ итерации шаг α_j выбирается таким, чтобы функционал, соответствующий $j+1$ итерации, принимал максимальное значение из всех, которые возможны на данном направлении движения.

Среди неградиентных методов поиска могут быть применены методы нелинейного программирования. В частности, удовлетворительные результаты дает метод деформируемого многогранника (разновидность симплекс-метода).

4.2. ЗОНАЛЬНОЕ И МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В предыдущем параграфе мы рассматривали случай, когда каждый привод адаптивного зеркала имеет свой канал управления, а каждая компонента вектора управляющих воздействий «отвечает» за деформацию поверхности в зоне расположения соответствующего привода. Поставим задачу по-иному. Предположим, что на зеркало с большим числом приводов возлагается задача компенсации дефокусировки, т. е. создания выпуклой или вогнутой поверхности, описываемой параболоидом вращения. В этом случае, очевидно, можно иметь всего один канал управления, заранее распределив весовые коэффициенты усиления по приводам. В канал управления будет направляться только информация об амплитуде и знаке кривизны поля. Аналогично поступают и с другими фазовыми возмущениями, подключая к каждому каналу, «отвечающему» за компенсацию своего фазового распределения, приводы зеркала с соответствующим весом, которые создают деформацию сразу всей поверхности. Общее фазовое возмущение $S(\rho)$, поступающее на вход системы, математически можно разложить в ряд по элементарным фазовым возмущениям, каждое из которых будет скомпенсировано с помощью одного такого канала управления с учетом того, что амплитуда и знак сигнала управления определяются коэффициентом разложения в ряд.

Разложение в ряд производится по функциям, удовлетворяющим условию ортогональности. Соответствующими функциями (пространственными модами) должны описываться и деформации адаптивного зеркала для каждого канала управления. Такое управление поверхностью зеркала называется модальным управлением, в отличие от зонального управления.

Модальное управление может быть реализовано на различных адаптивных зеркалах, в том числе на секционированных, а также на зеркале с изгибающим моментом (см. § 2.3).

Если фазовое возмущение $S(\rho)$ может быть представлено в виде ряда

$$S(\rho) = \sum_n a_n R_n(\rho),$$

где $R_1, \dots, R_n, \dots$ — конечная система ортогональных функций, таких, что

$$\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} R_i(\rho) R_j(\rho) d^2\rho = \delta_{ij}; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i=j, \\ 0, & \text{если } i \neq j, \end{cases}$$

то реализация совокупности деформаций на зеркале, заданных распределениями $(\lambda/4\pi)R_n(\rho)$ с амплитудой a_n , позволяет минимизировать ошибку компенсации возмущений $S(\rho)$.

Коэффициенты a_n связаны с $S(\rho)$ известным соотношением

$$a_n = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} S(\rho) R_n(\rho) d^2\rho.$$

Если заменить интеграл суммой по K точкам, в которых определена фаза $S(x_k, y_k)$, то

$$a_n = \frac{1}{K} \sum_{k,l} S(x_k, y_l) R_n(x_k, y_l).$$

Можно показать, проводя аналогию с процедурой минимизации ошибки при зональном управлении, что для системы функций $R_1, \dots, R_N$ матрица взаимного влияния становится диагональной, что упрощает расчеты. Таким образом, важной особенностью модального управления является упрощение процедуры поиска вектора управляющих воздействий, что в конечном счете сказывается на увеличении быстродействия системы.

В качестве $R_n(\rho)$ в адаптивной оптике принято использовать круговые полиномы Цернике, которые описывают классические aberrации оптических систем. Для квадратных (прямоугольных) апертур целесообразно использовать полиномы Лежандра. Приведем несколько первых полиномов Цернике, которые описывают в полярных координатах следующие aberrации:

дисторсию (наклон волнового фронта по двум осям)

$$R_1(\rho) = 2\rho \cos \theta; \quad R_2(\rho) = 2\rho \sin \theta;$$

кривизну поля (дефокусировку)

$$R_3(\rho) = \sqrt{3} (2\rho^2 - 1);$$

астигматизм

$$R_4(\rho) = \sqrt{6} \rho^2 \sin 2\theta; \quad R_5(\rho) = \sqrt{6} \rho^2 \cos 2\theta;$$

кóму

$$R_6(\rho) = \sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta; \quad R_7(\rho) = \sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta.$$

Модальное управление применяется и в системах апертурного зондирования. Для систем КОАТ фазовая модуляция производится почастотно для каждой моды. За счет возможного сокращения числа каналов управления по сравнению с зональным зондированием модальный метод позволяет добиться более высокого быстродействия. Однако при этом, по крайней мере, два фактора ограничивают его общую применимость. К ним относятся: более ярко выраженная нелинейность системы, наступающая при фазовых возмущениях, примерно вдвое меньших, чем для систем зонального зондирования, что отрицательно сказывается на ее устойчивости; меньшее отношение сигнал-шум на фотоприемнике, обусловленное характерным уменьшением области значений градиента показателя качества системы.

Рассмотрим алгоритмы оптимального управления, позволяющие в ряде случаев упростить или ускорить поиск вектора управляющих воздействий. Для этого обратимся к двум типам зеркал — со сплошной деформируемой пластиной и секционированному с поступательным перемещением секций.

Пусть имеются датчик Гартмана, измеряющий наклоны волнового фронта, и зеркало с непрерывной поверхностью. Традиционно для управления зеркалом необходимо математически восстановить общий волновой фронт из парциальных волновых фронтов. В [12] предложено исключить операцию восстановления и использовать информацию об углах наклона сразу для управления зеркалом, считая, что непрерывная поверхность зеркал автоматически «сшьет» парциальные волновые фронты. С этой целью минимизируется не средний квадрат

фазовой ошибки, а средний квадрат остаточных углов наклона волнового фронта. Процедуры минимизации аналогичны, в результате система уравнений для V имеет вид, аналогичный приведенному ранее, но с другими коэффициентами, выраженными через производные S и f :

$$V_1 G_{11} + \dots + V_N G_{1N} = P_1;$$

$$\dots \dots \dots V_1 G_{N1} + \dots + V_N G_{NN} = P_N;$$

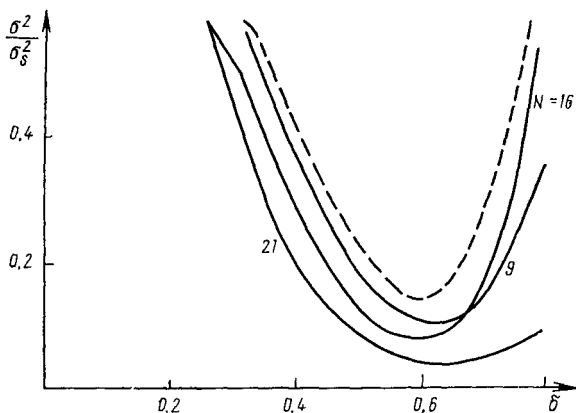
$$P_n = \int_{\Omega} S'(\rho) f'(\rho - \rho_n) d^2\rho; \quad G_{nm} = \int_{\Omega} f'(\rho - \rho_n) \times \\ \times f'(\rho - \rho_m) d^2\rho, \quad n, m = 1, \dots, N.$$

Ошибка компенсации для данного алгоритма, естественно, превышает ошибку алгоритма, оптимального по критерию среднеквадратичной ошибки, однако с увеличением точности компенсации эти ошибки сближаются. В [12] отмечено, что наибольшую целесообразность данный алгоритм имеет при улучшении угловой расходимости оптического пучка. Часто число точек в датчике, в которых определяется угол наклона волнового фронта, в несколько раз превышает число приводов адаптивного зеркала, поэтому процедура восстановления общего волнового фронта требует более сложной техники и большего времени, чем завершающая процедура определения управляющих воздействий. Таким образом, исключение операции восстановления здесь позволяет как сократить расчетное время, так и воспользоваться более простой ЭВМ.

В заключение остановимся на анализе зависимости точности оптимального управления от ширины функции отклика адаптивного зеркала. Будем называть отношение полуширины функции отклика по уровню e^{-1} к расстоянию между центрами крепления соседних приводов конструктивным параметром адаптивного зеркала. Из общих соображений ясно, что при слишком острой функции отклика (конструктивный параметр мал) поверхность зеркала будет подобна «гусиной коже» и рябь на поверхности отрицательно скажется на компенсации регулярных возмущений волнового фронта. В то же время значительная ширина функции отклика, накрывающей сразу несколько соседних приводов, очевидно, ухудшит пространственное разрешение зеркала.

На рис. 43 показана характерная зависимость ошибки компенсации от конструктивного параметра δ , из которой легко понять, что конструктивный параметр также допускает оптимизацию. Как правило, оптимальное значение конструктивного параметра лежит в пределах 0,4...0,8 и слабо зависит от числа каналов управления, алгоритма поиска управляющих воздействий, формы функции отклика, взаимного расположения приводов. Конечно, в отдельных случаях бывают исключения, например в практически важном случае компенсации общего наклона волнового фронта. При компенсации наклона конструктивный параметр целесообразно делать большим единицы. Действительно, из рис. 43 видно, что правильный выбор конструктивного параметра может создать преимущества и алгоритму управления по текущему значению фазы, и даже меньшему числу каналов управления.

Рис. 43. Характерная зависимость относительной дисперсии ошибки компенсации N -элементного зеркала от его конструктивного параметра (штриховая линия соответствует алгоритму управления по текущему значению фазы)



При прочих равных условиях гексагональная упаковка приводов обычно оказывается более эффективной с точки зрения точности компенсации, чем «квадратно-гнездовая».

Таким образом, следует подчеркнуть, что при значительной ожидаемой амплитуде фазовых возмущений важно провести предварительный расчет точности компенсации. Тогда результаты расчета позволили бы выбрать алгоритм управления, число приводов и конструктивный параметр адаптивного зеркала, или, иными словами, уточнить структуру системы, определить ее канальность и сконструировать адекватный исполнительный механизм.

Глава 5.

МЕТОДЫ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

5.1. ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ

Для того чтобы понять существо метода обращения волнового фронта (ОВФ) и его место в проблеме адаптивной компенсации искажений, обратимся к примеру. Предположим, что мы обладаем зеркалом, имеющим одно замечательное свойство — отражать все лучи в том же направлении и по тому же пути, откуда они пришли. Очевидно, такое ОВФ-зеркало позволяет лучи, испущенные из точечного источника, свести в точке их испускания (рис. 44).

Фактически ОВФ-зеркало формирует не отраженную в соответствии с известными оптическими законами, а обращенную волну (отсюда название явления). Волновые фронты падающего и обращенного излучения оказываются в точности совпадающими и распространяются навстречу друг другу.

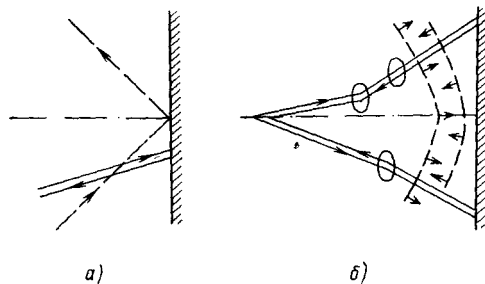


Рис. 44. Схема ОВФ-зеркала. а — отражение лучей ОВФ-зеркалом (штриховыми линиями обозначен ход лучей в обычном зеркале); б — отражение волнового фронта ОВФ-зеркалом в присутствии искажений

Обращающее волновой фронт зеркало аналогично изменяющему свою геометрию адаптивному зеркалу и может производить компенсацию фазовых возмущений, фокусируя излучение на приемнике. Сразу оговоримся, что ОВФ-зеркало не плод авторской фантазии. Его создание возможно, если использовать нелинейные эффекты взаимодействия света с некоторыми веществами.

Привлекательность концепции ОВФ состоит в том, что весь процесс компенсации искажений производится фактически одним элементом, например ячейкой с жидкостью или кристаллической пластинкой, причем процесс идет без применения измерителей волнового фронта и устройств управления исполнительным механизмом.

Мы рассмотрим наиболее развитые в настоящее время методы ОВФ на основе вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) и четырехволнового смещения (ЧВС), а также некоторые другие.

Возможность использования ВРМБ [14] для получения обращенной волны была открыта советскими физиками (см. § В.2). Напомним читателю механизм взаимодействия света и звука.

Если пучок света в среде встречает упругую (звуковую) волну, то на бегущей решетке плотности среды (а следовательно, и показателя преломления) свет дифрагирует. Направление дифракционного максимума в общем случае располагается под определенным углом к направлению падающего пучка света. Этот угол — угол рассеяния — зависит от соотношения между длинами световой и звуковой волн, показателя преломления среды. Поскольку свет дифрагирует на бегущей решетке, в рассеянном свете в соответствии с эффектом Доплера наблюдается сдвиг частоты, равный частоте звуковой волны. Таким образом, при распространении звуковой волны в том же направлении, что и падающий световой пучок, рассеянный «назад» свет имеет частоту, несколько меньшую частоты падающего излучения (стоксова волна). При встречном направлении звука рассеянный свет, напротив, имеет частоту, несколько большую частоты падающего излучения (антистоксова волна).

При ВРМБ в результате действия мощного светового импульса возбуждается первоначально слабая стоксова волна, которая

образуется при рассеянии на возникающей тепловой упругой волне. Поле падающего излучения (волна накачки) интерферирует со стоксовой волной. В местах расположения максимумов вследствие явления электрострикции происходит изменение объема диэлектрика в сильном электрическом поле. Так образуется решетка возмущений плотности. Указанные возмущения, в свою очередь, усиливают стоксову компоненту, интерферирующую с падающей волной. Таким образом действует механизм раскачки, который приводит к усилению стоксовой волны вплоть до интенсивностей, сравнимых с интенсивностью падающего излучения. Для образования механизма раскачки необходимы достаточно высокая интенсивность излучения и большая длина трассы в рассеивающей среде. Поскольку преимущественно усиление возникает на трассе распространения в кювете с рассеивающей средой, стоксова волна распространяется точно навстречу падающему излучению.

Уже в ранних экспериментальных работах (В. И. Беспалов, А. М. Кубарев) было замечено, что стоксово излучение распространяется примерно в том же узком телесном угле, что и волна накачки, однако только открытие явления ОВФ дало исчерпывающее объяснение этому факту.

Для пояснения механизма ОВФ, реализуемого с использованием процесса ВРМБ, обратимся к описанию, приведенному в [5]: «В этом процессе подвергаемая ОВФ неоднородная по пространственной структуре волна накачки создает для встречной волны (сдвинутой по частоте в стоксову область на частоту гиперзвука) неоднородный профиль усиления. Первоначально стоксова волна зарождается в результате спонтанного рассеяния волны накачки и затем усиливается в неоднородном профиле усиления с локальным инкрементом (показателем усиления. — *Примеч. авт.*), пропорциональным интенсивности падающей волны. С максимальным темпом нарастает та часть стоксовой волны, пространственные всплески интенсивности которой приходятся на области с наибольшим усилением (области с наибольшими значениями интенсивности волны накачки). В результате встречная волна формируется в волну с обращенным волновым фронтом, имеющим такую пространственную структуру поля, которая воспроизводит (с комплексным сопряжением) поле волны накачки». Разность частот между стоксовой волной и волной накачки соответствует звуковым волнам очень высокой (гиперзвуковой) частоты (около 1 ГГц). Гиперзвук в среде быстро затухает — на расстоянии примерно 10 мкм, поэтому световые волны взаимодействуют локально. Иными словами, такое рассеивающее строго назад ВРМБ-зеркало имеет высокую пространственную разрешающую способность, которую можно сравнить только с гипотетическим адаптивным зеркалом, имеющим бесконечно большое число степеней свободы.

Следует отметить, что, в отличие от фазового сопряжения, осуществляемого адаптивным зеркалом, процесс ОВФ автоматически учитывает неоднородности амплитудного распределения и соответствующую дифракционную расходимость излучения.

Постоянная времени процесса ОВФ (при ВРМБ — не более 10^{-9} с, где 10^{-9} с — значение, обратное частоте гиперзвука) позволяет осуществлять практически безынерционное обращение очень коротких световых импульсов.

Вся аппаратура ОВФ представляет собой кювету (светопровод) длиной 0,1 ... 1 м, диаметром 1 см с жидкостью или газом под высоким давлением. В качестве обрабатываемых сред используются следующие жидкости: ацетон, бензол, толуол, сернистый углерод, тетрахлориды IV группы периодической системы элементов (чаще всего хлористый углерод), тяжелая вода, а также газы: метан (под давлением 125 ... 150 атм), гексафторид серы (под давлением 20 атм). Обращение волнового фронта обнаружено и в многомодовых оптических волокнах.

Обычно для исследования процессов ОВФ применяются генераторы с модулированной добротностью на алюмоиттриевом гранате, неодимовом стекле и т. п. ($\lambda = 1,06$ мкм) или рубине ($\lambda = 0,69$ мкм), характеристики которых хорошо подходят для ОВФ. Они дают излучение с длительностью моноимпульса 5 ... 50 нс и энергией 0,05 ... 50 Дж. Применение указанных генераторов позволяет легко получать высокую интенсивность волны накачки для превышения порога возбуждения процесса ВРМБ ($1 ... 10$ МВт/см²).

В практически важном среднем ИК-диапазоне, например для $\lambda = 10,6$ мкм, ОВФ осуществить сложнее, так как энергетический порог при этом может в сотни раз превышать порог для источников видимого излучения. Поэтому ОВФ излучения генераторов с $\lambda = 10,6$ мкм производят в поле двух встречных волн накачки.

Падающее излучение, взаимодействуя со встречной волной накачки, образует гиперзвуковую волну. На гиперзвуке рассеивается другая волна накачки, в результате чего возникает обращенная по отношению к падающей волна (этот процесс называется четырехволновым взаимодействием). Более подробно четырехволновые процессы рассматриваются в § 5.2.

Четырехволновое взаимодействие используется и при обращении волн ультрафиолетового диапазона. В этом случае могут быть применены среды с высокой нелинейностью (сероуглерод CS_2) с добавлением растворителей, прозрачных для УФ-излучения (гексан).

Механизм ВРМБ в настоящее время является наиболее популярным для реализации ОВФ. Он имеет сравнительно низкий энергетический порог и осуществляется в достаточно прозрачных средах. Последнее обстоятельство является важным, так как наличие теплового расплывания пучка в среде ограничивает возможность ОВФ. В приложении к адаптивным оптическим системам этот механизм также предпочтителен, поскольку сопровождается весьма малым сдвигом частоты излучения.

Другие известные механизмы вынужденного рассеяния излучения, которые образуют обращенную волну, — вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние крыла линии Рэлея, вынужденное температурное рассеяние — имеют тот или иной не-

достаток, ограничивающий их применение. Так, процесс вынужденного комбинационного рассеяния идет с большим стоксовым сдвигом частоты; рассеяние крыла линии Рэлея возникает при сравнительно высоком пороговом уровне, а температурное рассеяние оказывается зависящим от нестационарного теплового расширения вещества.

Процесс вынужденного комбинационного рассеяния света идет аналогично процессу ВРМБ с образованием решетки диэлектрической проницаемости. Физически изменение диэлектрической проницаемости связано с изменением поляризуемости молекул в результате колебаний ее атомов. Частота рассеянного света, таким образом, комбинируется из частоты падающего света и частоты внутримолекулярных колебаний. В результате рассеянный свет содержит два спутника (аналоги стоксовой и антистоксовой компонент). Однако, в отличие от процесса ВРМБ, комбинационное рассеяние приводит к более заметному сдвигу частоты рассеянного света.

Образование спектра рассеяния на крыле линии Рэлея обусловлено флуктуациями анизотропии вещества. При вынужденном процессе происходит некоторое упорядочение ориентации молекул в световом поле, что приводит к изменению диэлектрической проницаемости.

Вынужденное температурное рассеяние осуществляется на бегущей решетке диэлектрической проницаемости, образующейся благодаря наведенной температурной решетке, которая, в свою очередь, своим возникновением обязана процессу поглощения излучения в среде. Подробнее с указанными механизмами ОВФ можно познакомиться в [3].

Замечательным свойством механизмов вынужденного рассеяния является то, что качество обращения волнового фронта тем лучше, чем больше нерегулярность искаженного волнового фронта, которая вызывает мелкозернистую неоднородность распределения интенсивности (спекл-структуру) волны накачки. Со спекл-структурой мы уже сталкивались в гл. 1. Напомним, что спекл-структуру можно наблюдать при освещении когерентным светом шероховатого экрана. Аналогичная картина, отличающаяся, возможно, лишь масштабом пятен, возникает при пропускании света через пластину с сильными неоднородностями.

Изучение спекл-полей оказалось настолько плодотворным для описания ОВФ в нелинейной среде, что явилось причиной ввода в 1984 г. Б. Я. Зельдовичем и В. В. Шкуновым специального термина, описывающего обращенное волновое поле в спекл-неоднородной среде, — «спеклон» [15]: «...спеклоном в задаче ОВФ—ВР (вынужденное рассеяние — *Примеч. авт.*) называется решение $E_s(\mathbf{r}, z)$ волнового уравнения в среде с оптическими неоднородностями, наведенными спекл-структурой некоторого поля накачки $|E_L(\mathbf{r}, z)|^2$, обладающее следующими свойствами: 1) благодаря коррелированности неоднородностей спеклона $E_s \sim E_L^*$ с неоднородностями среды, т. е. благодаря пространственному резонансу,

спеклон имеет большой коэффициент усиления и 2) благодаря повышенному усилению спеклон устойчив относительно искажений». Свойство устойчивости спеклона при распространении в оптически неоднородной среде оказывается решающим при ОВФ, поскольку волна, обращенная в некотором сечении, остается обращенной и во всем объеме среды.

5.2. ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА МЕТОДОМ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ

Для реализации метода ЧВС воспользуемся простой голографической схемой (рис. 45, а). Эта схема легла в основу осуществления компенсации статических фазовых возмущений в упомянутом в § В. 2 эксперименте Катея.

На фотопластинку направляются две волны: искаженная, подлежащая обращению, E_3 и известная (плоская, сферическая) опорная E_1 . В результате интерференции волн на фотопластинке после проявления образуется голограмма. Если теперь направить на фотопластинку световую волну E_2 , обращенную к опорной волне, как показано на рис. 45, а, то голограмма восстановит волновой фронт искаженного излучения, причем он будет распространяться во встречном к E_3 направлении (волна E_4), т. е. представлять собой результат ОВФ.

Процесс записи и считывания голограммы с помощью четырех волн можно провести в реальном масштабе времени, используя вместо фотопластинок специальные нелинейные среды, в которых в присутствии интерферирующих полей возникают соответствующие изменения диэлектрической проницаемости (рис. 45, б). Поэтому ОВФ при четырехволновом смешении иногда называют ОВФ методом динамической голографии.

Для ЧВС используются среды с так называемой кубичной оптической нелинейностью. Под воздействием светового поля в таких средах происходит изменение поляризованности, т. е. дипольного момента единицы объема. Это изменение пропорционально третьей степени напряженности поля, что подчеркнуто в названии оптической нелинейности. Кубическая зависимость поляризованности от поля означает, что диэлектрическая проницаемость среды оказывается зависящей от второй степени напряженности (т. е. от интенсивности) светового поля.

Наиболее известна керровская нелинейность, физический механизм образования которой связан с упорядочением ориентации

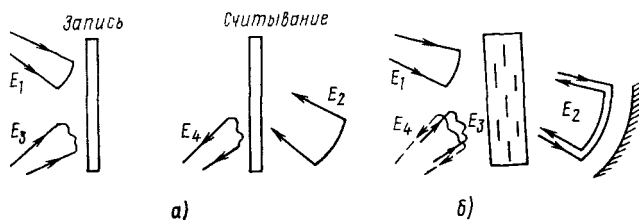


Рис. 45. Схема получения ОВФ методом ЧВС:

а — запись и считывание в статической голографии; б — обращение в нелинейной среде

осей молекул в интенсивном поле. Поэтому в ЧВС используются классические для реализации эффекта Керра среды (например, жидкий сероуглерод). Время установления керровской нелинейности обычно составляет около 10^{-12} с.

Рассмотрим характерный пример ОВФ в сероуглероде. Для генератора на неодимовом стекле с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм при длине светопровода 0,1 м и интенсивности 10 МВт/см² коэффициент отражения искаженной волны E_3 в обращенную волну E_4 составляет $|E_4|^2/|E_3|^2 \approx 20\%$.

Керровская нелинейность сравнительно невелика, поэтому в ОВФ широкое применение нашли иные физические механизмы нелинейности — прежде всего связанные с электронной поляризованностью полупроводниковых кристаллов [3] (практически безынерционные процессы с постоянной времени до 10^{-15} с).

Подходящими средами для ЧВС являются также газы, в частности SF₆, NH₃, BCl₃ (для $\lambda = 10,6$ мкм), а также пары. Кроме того, зарегистрировано ОВФ в диэлектрических кристаллах — рубине, александрите, содержащих ионы хрома, и др.

Как уже отмечалось, большой оптической нелинейностью обладают некоторые полупроводниковые материалы. Применение полупроводников позволяет осуществлять ОВФ для актуального ИК-излучения с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм (Ge, Hg_{1-x}Cd_xTe, InSb). Известны и другие полупроводники для ОВФ методом ЧВС — Bi₁₂SiO₂₀, Bi₁₂GeO₂₀, CdS, CdTe, а также сегнетоэлектрики — ниобат лития, танталат лития, титанат бария и др.

Некоторые кристаллы (силикат, германат висмута) обладают свойством запоминать динамические голограммы. Поэтому они могут быть использованы в режиме «запись-считывание-стирание». Стирание можно осуществить, например, однородной засветкой кристалла.

Еще одним классом веществ для ЧВС являются растворы красителей, представляющих собой сложные органические соединения. В большинстве экспериментов с красителями возникновение изменений диэлектрической проницаемости обусловлено наведенной температурной решеткой, которая образуется в результате преобразования поглощенной энергии излучения в тепло.

В качестве механизма, лежащего в основе ЧВС, может быть использован и процесс ВРМБ. Для получения больших коэффициентов отражения ОВФ-зеркал используются так называемые гиперзвуковые обрабатывающие зеркала. В этом случае среду, активную к ВРМБ, освещают встречными накачками. Искаженное излучение, взаимодействуя со встречной накачкой, приводит к появлению гиперзвуковой волны, на которой рассеивается свет второй накачки и образуется обращенная волна (см. § 5.1). Разность частот искаженной волны и встречной волны накачки подбирается таким образом, чтобы она (разность) совпадала с частотой гиперзвука, возбуждаемого этими волнами. В результате в гиперзвуковом зеркале производится достаточно эффективная пе-

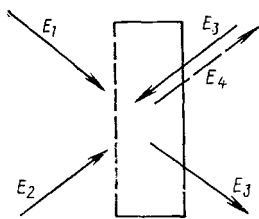


Рис. 46. Схема ОВФ при попутном ЧВС

рекачка энергии второй накачки в обращенную волну. С помощью данного процесса получены коэффициенты отражения ОВФ-зеркала много больше единицы (до 10^6).

Гиперзвуковые зеркала, в отличие от рассмотренных динамических голограмм, реализующих взаимодействие волн одинаковой частоты (так называемое вырожденное четырехволновое взаимодействие), дают обращенную волну с частотой, несколько отличающейся от частоты падающего излучения (невыврожденное взаимодействие).

Остановимся на некоторых свойствах ЧВС. Во-первых, заметим, что обращенная волна, взаимодействуя с опорными волнами, образует обращенную к себе волну, т. е. волну искаженного падающего излучения, которая, в свою очередь, также образует обращенную волну. Этот процесс самосогласованного усиления обращенной волны идет за счет перекачки энергии из опорных волн в пару взаимнообращенных волн E_3 и E_4 (эффект связанных волн).

Механизм ЧВС обладает селектирующим свойством, обращая только ту часть падающего излучения, которая имеет заданную частоту и направление, устранив паразитные частотно-угловые спектральные составляющие.

Одним из свойств ЧВС, в отличие от ВРМБ, является принципиальная возможность получения обращенной волны с требуемой поляризацией, которая может не совпадать с поляризацией падающей волны. Для этого требуется определенный выбор геометрии схемы обращения и поляризации опорных волн [3].

Обращение ЧВС можно осуществлять непосредственно в активной среде, используя излучение внутри резонатора в качестве встречных опорных волн. При этом падающая и отраженная волны дополнительно усиливаются активной средой.

В заключение отметим, что ЧВС, дающее ОВФ, может быть осуществлено и при попутном смещении опорных волн. Рассмотрим схему, представленную на рис. 46. Опорные волны E_1 и E_2 через полупрозрачное зеркало направляются в нелинейную среду. Если направить искаженную волну E_3 навстречу опорным волнам, то она, отразившись от полупрозрачного зеркала, взаимодействует с опорной волной. Образованная динамическая голограмма при освещении ее излучением E_2 дает обращенную волну E_4 . Таким образом, схема попутного смещения сводится к классической схеме ЧВС. Однако имеется и принципиальное отличие, которое заключается в том, что E_1 и E_2 распространяются под малым, но конечным углом к некоторому общему направлению. Образующая голограмма производит небольшой поперечный сдвиг обращенной волны E_4 относительно E_3 . Величина этого сдвига пропорциональна на указанному углу и длине пути в нелинейной среде.

Попутное ЧВС наблюдается, например, в спиртовом растворе красителя для генератора с $\lambda=1,06$ мкм и выходной энергией ~ 1 Дж. В этом случае физическим механизмом образования динимической голограммы является тепловое изменение диэлектрической проницаемости. При угле схождения волн E_1 и E_2 , равном примерно 8° , эффективность перекачки энергии в обращенную волну составляет 10% от энергии пучка накачки.

5.3. ДРУГИЕ МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Метод ОВФ является развивающимся направлением, и пути его реализации не исчерпываются рассмотренными методами вынужденного рассеяния и четырехволнового смешения. Осуществляются ОВФ, основанные на других механизмах, изыскиваются новые способы и подходящие вещества. Рассмотрим некоторые методы ОВФ, носящие по сравнению в ВРМБ- и ЧВС-обращениями более экзотический характер.

Обращение при трехволновом смешении осуществляется при взаимодействии искаженной волны частоты ω с опорной волной E удвоенной частоты 2ω (рис. 47). Существуют среды, например кристалл дигидрофосфата калия KH_2PO_4 (KDP), в которых диэлектрическая проницаемость линейно зависит от напряженности оптического поля, — так называемые квадратично-нелинейные среды. Под воздействием сильного оптического поля опорной волны в кристалле возникает решетка диэлектрической проницаемости. Искраженная волна, попутная опорной, возбуждает волну с комбинационной частотой $2\omega - \omega = \omega$. В результате в направлении вперед распространяется волна E'_4 с частотой, равной частоте искаженного излучения, но сопряженная ему по фазе. Получение сопряженной волны, двигающейся в попутном направлении, практически может пригодиться для компенсации искажений в волоконных линиях связи.

Для ОВФ искаженной волны достаточно просто установить зеркало, поверхность которого параллельна волновому фронту плоской опорной волны. Отразившись от зеркала, возбужденная волна становится обращенной по отношению к падающей.

Если падающая волна распространяется не перпендикулярно к зеркальной поверхности, а под небольшим углом, то существует

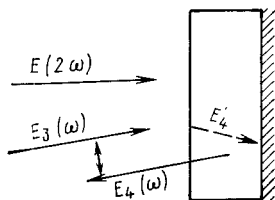


Рис. 47. Схема ОВФ методом трехволнового смешения

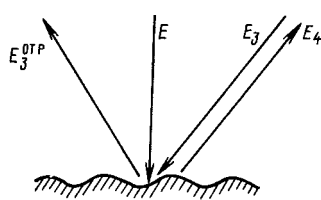


Рис. 48. Схема ОВФ отражающей поверхностью

малый поперечный сдвиг возбужденной волны относительно направления распространения точно обращенной волны.

Обращение при трехволновом смещении практически осуществляется в тонких нелинейных кристаллах, на длине которых слабо проявляются дифракция и сдвиг взаимодействующих волн. Определенные трудности возникают в связи с необходимостью отделения отраженных зеркалом падающей и сопряженной волн. Оценка эффективности трехволнового смещения для кристалла KDP толщиной 1 см при интенсивности опорной волны 10 МВт/см^2 дает $|E_4/E_3|^2 \approx 5 \cdot 10^{-3}$ ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$). В десятки раз более эффективно использование кристаллов с сильной оптической нелинейностью (LiIO_3 , LiNbO_3).

Физически появление квадратичной нелинейности обусловлено нелинейностью связанных электронов, поэтому постоянная времени процесса обращения — величина порядка периода световых колебаний. Иными словами, процесс ОВФ при трехволновом смещении безынерционен. Это позволяет осуществлять ОВФ субнаносекундных и пикосекундных импульсов излучения (в отличие от механизмов взаимодействия встречных волн, где короткий импульс не позволяет эффективно задействовать всю длину светопровода).

Явление ОВФ при суперлюминесценции наблюдается, например, в красителях. При освещении вещества излучением оптической накачки создается инверсная заселенность молекул и, следовательно, усиление на частоте люминесценции, которая согласно правилу Стокса обычно меньше возбуждающей частоты.

Процесс ОВФ в условиях суперлюминесценции во многом аналогичен процессу обращения при ВРМБ. В обоих случаях локальный инкремент для встречной волны возрастает с ростом интенсивности проходящего через среду излучения. Наблюдаемая эффективность ОВФ при суперлюминесценции составляет 10 ... 20%.

Одним из способов получения ОВФ является обращение отражающей поверхностью. Если предположить, что поверхность обладает нелинейными свойствами, а именно коэффициент отражения зависит от интенсивности света, то в результате интерференции двух направленных на поверхность волн можно получить пространственную модуляцию коэффициента отражения. Для получения ОВФ строго перпендикулярно поверхности направляют опорную волну и под углом — искаженную волну. Отраженное поле содержит три составляющие: зеркально отраженную опорную волну, зеркально отраженную искаженную волну и отраженную от образующей в результате интерференции решетки обращенную волну (рис. 48). Запись и считывание динамической голограммы здесь осуществляются в тонком поверхностном слое. Толщина этого слоя не превышает длины волны излучения.

При отклонении опорной волны от нормали к поверхности на небольшой угол θ обращенная волна получает угловое смещение относительно падающей искаженной волны на угол 2θ . Интенсивность обращенной волны оказывается зависящей от интенсивности не только обращаемого, но и опорного излучения. Усиление

обращенной волны происходит за счет перекачки в нее части энергии опорной волны.

Одним из механизмов обращения волнового фронта поверхностью является тепловое расширение поверхности термопластичного материала в максимумах интенсивности. Образуется решетка рельефа поверхности с постоянной времени порядка 1 мс и характерным коэффициентом отражения обращенной волны $|E_4/E_3|^2 \approx 2\%$.

Обращение волнового фронта поверхностью наблюдается также на полупроводниках: германии, кремнии, арсениде галлия и др. В этом случае происходит нелинейное отражение вследствие изменения оптических свойств полупроводников вблизи поверхности на толщине порядка $\lambda/2\pi$. Такие изменения происходят, если энергия поглощаемого кванта света больше ширины запрещенной зоны, что позволяет электронам из валентной зоны попадать в зону проводимости. Под действием импульса излучения с $\lambda \leq 1$ мкм диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя изменяется, а следовательно, согласно формулам Френеля изменяется и коэффициент отражения излучения. Экспериментально получены значения $|E_4/E_3|^2$, равные 7%.

Чрезвычайно высокой чувствительностью при обращении волнового фронта поверхностью обладают управляемые оптические транспаранты на жидких кристаллах (плотность мощности падающего излучения около $3 \cdot 10^{-3}$ Вт/см²). Такие транспаранты состоят из фоточувствительного слоя полупроводника и жидкого кристалла, к которому приложено напряжение (см. § 2.6). С помощью управляемого оптического транспаранта с зеркалом создаются динамические голограммы, обращающие волновой фронт.

В настоящее время жидкокристаллические транспаранты имеют характерные значения постоянной времени ($10^{-2} \dots 10^{-3}$ с), существенно большие, чем иные ОВФ-зеркала. Их быстроедействие скорее сравнимо с быстрымдействием адаптивных зеркал.

Здесь уместно заметить, что мы подошли к концепции создания управляемых оптических элементов, которая изложена в главе, посвященной адаптивным зеркалам. Таким образом, две концепции компенсации фазовых возмущений (с применением адаптивного зеркала и ОВФ в нелинейных средах) как бы сходятся на управляемых оптических транспарантах, что было подчеркнуто нами в § 2.6.

Обращение, а вернее, псевдообращение волнового фронта можно осуществить и с помощью линейных элементов — специальных отражателей, называемых ретрозеркалами. Ретрозеркальная поверхность составлена из уголкового отражателей, которые имеют свойство отражать падающий луч строго в обратном направлении (рис. 49). Ретрозеркала широко применяются на практике. Достаточно упомянуть световозвращатели — катафоты, устанавливаемые на велосипедах, мотоциклах, автомобилях и т. п.

Каждый уголкового отражатель возвращает обратно соответствующий участок пучка излучения, благодаря чему происходит

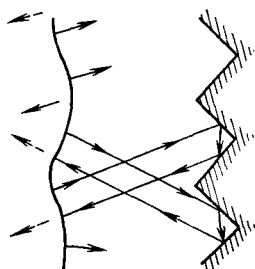


Рис. 49. Схема псевдоОВФ с применением ретрозеркала

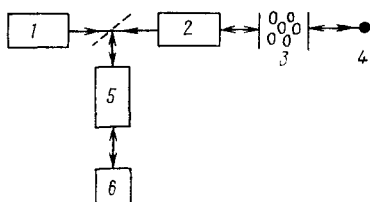


Рис. 50. Схема компенсации возмущений с применением ОВФ-зеркала:
1 — генератор излучения; 2 — оптический усилитель; 3 — искажающий канал; 4 — облучаемая цель; 5 — усилитель слабых оптических сигналов; 6 — ОВФ-зеркало

компенсация изменений наклонов волнового фронта. По мере уменьшения масштаба неровностей волнового фронта размер угловых отражателей требуется уменьшать. Однако использование очень мелких элементов нецелесообразно не только по конструктивно-технологическим соображениям, но и физически. Действительно, уголкового отражателя не обеспечивают согласования фаз между отдельными участками пучка излучения, поэтому в общем случае отраженное от ретрозеркала излучение приобретает расходимость, которая определяется дифракцией на апертуре одного элемента. Если размер элемента b мал, то угол дифракционной расходимости λ/b может давать существенный вклад в общую расходимость пучка. Поэтому от ретрозеркала нельзя ожидать высокой точности компенсации. В то же время при сильных искажениях волнового фронта ретрозеркала достаточно эффективны. Хотя они и не позволяют получить дифракционный предел для пучка заданного размера, существенное улучшение расходимости ретрозеркалом вполне реально. Так, экспериментально показано уменьшение расходимости излучения генератора в 10 раз при использовании ретрозеркала в качестве одного из зеркал резонатора, а в оптическом усилителе расходимость была улучшена в 4 раза.

Остановимся на резонаторах и усилителях с обращающим зеркалом. Независимо от механизма ОВФ эти устройства привлекают внимание как своими весьма любопытными свойствами, так и большим практическим потенциалом.

В резонаторе с обращающим зеркалом оптические неоднородности активной среды в идеале можно не учитывать. При этом оказывается, что резонатор излучает поле, не согласованное с формой зеркала резонатора. Иными словами, появляется возможность формировать пучок, структура которого не отвечает структуре обычного резонатора. Зеркало ОВФ настраивает резонатор таким образом, чтобы потери излучения были минимальными. В терминах геометрической оптики луч, имеющий угловое отклонение от оси и совершающий бесконечно большое число проходов в резонаторе, не уйдет далеко от оси резонатора. Резонаторы, обладающие таким свойством, называют устойчивыми резонаторами, в от-

личие от неустойчивых (например, телескопических, образованных вогнутым зеркалом и меньшим по размеру выпуклым зеркалом), где потери излучения велики. Учитывая широкое распространение неустойчивых резонаторов, следует подчеркнуть, что для резонаторов с зеркалом ОВФ класс неустойчивых резонаторов не существует. Поэтому для неустойчивых резонаторов зеркала ОВФ не подходят — в этом случае необходимо использовать концепцию адаптивного зеркала, исправляющего искажения волнового фронта.

Для повышения мощности оптического сигнала часто используют двухпроходовой усилитель, который, однако, заметно ухудшает расходимость излучения. Последнее обусловлено наличием сильных неоднородностей в активной среде усилителя. Зеркало ОВФ позволяет осуществить компенсации возмущений излучения в усилителе. Отраженная обращенная волна, пройдя через неоднородности в обратном направлении, усилится и выйдет без искажений, приобретенных в усилителе.

В [5] сообщается о компенсации возмущений в двухпроходовом усилителе для длины волны $\lambda = 10,6$ мкм. Авторам удалось при малой энергии входного сигнала (1 мДж) и длительности импульса 1 мкс получить почти дифракционную расходимость излучения (при близком к предельному энергоусоеме $2 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³).

Развитие техники ОВФ позволяет реализовать простую схему самонаведения света и компенсации возмущений независимо от конкретного практического приложения (рис. 50). На рисунке изображен задающий генератор, излучение которого проходит оптический усилитель и через искажающий канал (атмосферу) направляется к цели. Отраженный от цели слабый оптический сигнал проходит через оптический усилитель и направляется на ячейку ОВФ. Обращенная волна проходит через тот же самый усилитель и достигает цели в уже исправленном виде. Таким образом, отраженная от цели и обращенная по отношению к ней волны проходят один и тот же путь, так что искажения, возникающие на этом пути, оказываются скомпенсированными.

Обращение слабых сигналов целесообразно проводить с помощью ЧВС на гиперзвуковом зеркале при коэффициенте отражения зеркала более $10^3 \dots 10^4$. В этом случае требуется создание мощного источника опорных волн.

Подчеркнем, что для практического применения ОВФ-зеркал важны две основные проблемы: ОВФ излучения малой мощности в непрерывном режиме и ОВФ для излучения с длиной волны 10,6 мкм.

В заключение отметим, что наряду с рассмотренными выше физическими механизмами ОВФ существуют менее известные механизмы. Ограничимся только перечислением некоторых процессов, отсылая интересующего читателя к приведенной литературе. В качестве примеров нелинейных процессов можно привести явление фотонного эха, брэгговское трехволновое смещение [3], а линейных — зеркально-линзовую систему с ячейкой Цернике.

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

6.1. ПЕРЕДАЧА СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ
НА ДАЛЕКИЕ РАССТОЯНИЯ

Адаптивная оптика родилась из потребностей современной техники, и ее развитие, как мы увидим, оправдывает самые смелые проекты. Попытаемся представить наиболее характерные области применения адаптивной оптики — от наиболее сложных и дорогостоящих комплексов до сравнительно простых и скромных систем улучшения качества оптических устройств.

Одним из крупных современных проектов является линия передачи световой энергии Земля — космос, предназначенная для питания искусственного спутника Земли (орбитальной станции). Идея состоит в том, чтобы при пролете ИСЗ над местом расположения передатчика световой энергии направить оптический луч ИК-диапазона с Земли на приемное устройство спутника и затем преобразовать полученную спутником световую энергию в те виды энергии, которые нужны для поддержания его жизнедеятельности. По проекту фирмы Rockwell International (США), разработанному по заказу NASA, передатчик должен иметь мощность 5 МВт. При этом на спутник может быть передано от 20 до 65% полной мощности, а при тщательном выборе длины волны излучения — не менее 50%. В последнем случае должен быть использован генератор на изотопах $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ с длиной волны 9,1 мкм.

Общий вид передатчика представлен на рис. 51. Передатчик представляет собой фазированную решетку, объединяющую семь генераторов.

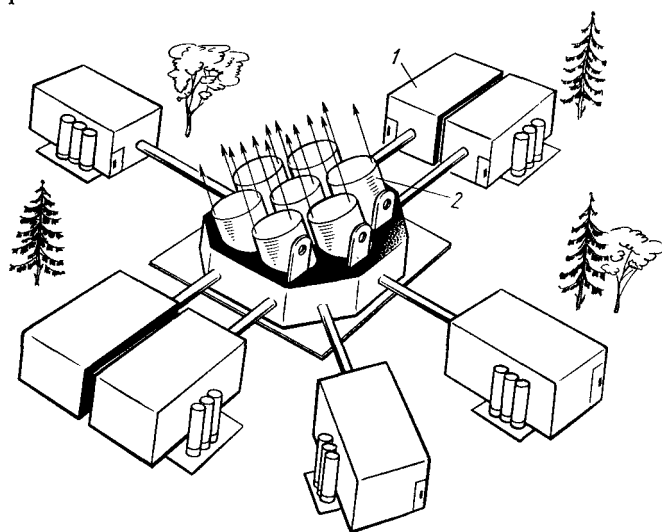


Рис. 51. Система передачи энергии на искусственный спутник Земли:
1 — генератор; 2 — оптический телескоп

Общая апертура размером 4,9 м состоит из семи субапертур размером по 1,4 м каждая. Передатчик размещается в горах на высоте 3500 м над уровнем моря, что позволяет снизить влияние атмосферы на оптический пучок.

При размещении передатчика в равнинной местности (по проекту предусмотрено 10 м над уровнем моря) коэффициент передачи снижается (за счет более ярко выраженных процессов поглощения излучения, атмосферной турбулентности, самоиндуцированного распывания. Кстати, в этом случае целесообразнее перейти на длину волны 3,8 мкм).

Спутник вращается на низкой орбите (около 200 км) и имеет приемную антенну размером 2 м, снабженную угольным отражателем размером около 10 см, и находится в поле зрения системы приблизительно 80 с.

Техническое устройство подобной системы весьма сложно. Система должна включать в себя несколько цепей управления фазой. Фазирование генераторов осуществляется с применением местного гетеродина (стабильного генератора небольшой, около 10 Вт, мощности), причем определение составляющей фазовой ошибки, получаемой при анализе возвращенной от спутника волны, должно предусматривать применение перестраиваемого по частоте гетеродинного источника (в соответствии с доплеровским сдвигом частоты, обусловленным движением космического объекта). Перестраиваемый по частоте генератор позволяет обеспечить необходимую полосу пропускания приемного устройства в условиях эффекта Доплера при сдвиге частоты не менее 1 ГГц.

Генерируемое излучение источника анализируется гетеродинным датчиком, в который направляется также излучение общего для всех генераторов гетеродина. Датчик позволяет выделить среднее значение фазового сдвига на апертуре, составляющие наклона и дефокусировки, а также высшие составляющие фазовых возмущений генерируемого излучения. Соответствующие сигналы коррекции направляются к генератору, зеркалу с переменным наклоном по двум осям, устройству фокусировки и деформируемому адаптивному зеркалу с многими степенями свободы. Таким образом, производится «очищение» излучения генератора для последующей работы с качественным пучком. «Очищенное» излучение через второе деформируемое адаптивное зеркало направляется на зеркала оптического шарнира, последними из которых являются зеркала с переменным наклоном и телескоп, расширяющий выходной пучок до 1,4 м. Данный контур адаптивной системы предназначен для компенсации атмосферных искажений излучения и точного наведения пучка на ИСЗ. Первичная информация для работы этого контура поступает в виде оптического сигнала, отраженного назад угольным отражателем приемной антенны ИСЗ. Возвращенное излучение анализируется гетеродинным датчиком вместе с излучением перестраиваемого (по доплеровскому сдвигу частоты) гетеродина, после чего сигналы управления поступают на исполнительные элементы системы, ответственные за компенсацию

соответствующих порядков аберраций. В управляющую ЭВМ поступает также информация для учета доплеровского сдвига частоты и углов опережения по азимуту и углу места. Эта информация может быть получена по каналам астронавигационной системы.

Рассмотрим подробнее возможный порядок работы. При появлении спутника над горизонтом данные о его положении поступают в процессор, управляющий положением выходных телескопов. Формируются данные об углах опережения и доплеровском сдвиге частоты. Работа начинается с включения одного из каналов, на телескоп которого подается сигнал дефокусировки. Расходящийся пучок направляется к спутнику и, отражаясь от уголкового отражателя, поступает в гетеродинный датчик, после чего сигнал дефокусировки снимается и начинают работать остальные шесть каналов. Этап захвата цели одним каналом вполне реален, так как при современной точности определения координат спутника работа осуществляется при высоком отношении сигнал-шум ($10^2 \dots 10^3$).

Модульный принцип построения системы передачи энергии на большие расстояния, использованный в данном передатчике, оказывается весьма привлекательным, однако его реализация связана с рядом сложных технических задач. Одной из них является перенесение принципа фазирования отдельных независимых генераторов небольшой мощности (фазированной решетки, см. § 1.2) на более высокий уровень мощности.

Применение одного генератора значительной мощности связано с альтернативным вариантом построения передатчика. Это может быть система фазового сопряжения возвращенного излучения на основе датчика Гартмана или система апертурного зондирования.

В отличие от системы апертурного зондирования система фазового сопряжения требует объединения приемной и передающей апертур. Для того чтобы повысить отношение сигнал-шум в приемной системе, в качестве диафрагмы Гартмана целесообразно использовать одно из зеркал системы, в котором проделаны малые отверстия. Наибольшие помехи здесь будет создавать фон, обусловленный рассеянием излучения на зеркалах системы. Система апертурного зондирования позволяет избежать проблем, связанных с общей приемно-передающей апертурой. При этом полезный сигнал на этапе захвата приблизительно в $10^2 \dots 10^3$ раз превосходит шумы детектора, а в начале этапа сопровождения отношение сигнал-шум повышается до 10^6 .

Несмотря на упрощение схемы построения, указанные варианты передающей адаптивной оптической антенны должны иметь моноапертуру размером 4,8 м и даже более (около 7 м), если на выходе используется система из двух плоских наклонных зеркал, осуществляющих слежение за спутником (зеркал целостата). Стоимость оптических элементов таких габаритов чрезвычайно велика, поэтому одним из путей реализации передатчика является усложнение оптической схемы за счет использования синтезированной апертуры (рис. 52).

С этой целью излучение генератора с помощью пирамиды с отражающими гранями может быть разбито на несколько (например, шесть) отдельных пучков, каждый из которых имеет собственный тракт и выходной телескоп. В отличие от моноапертурных вариантов в контуре адаптации для отдельных пучков учитывается относительный сдвиг фазы. Излучение направляется к спутнику шестью телескопами. Для точного наведения каждого телескопа на спутник целесообразно осуществить пробные колебательные возмущения пучков на различающихся частотах. Это позволит аналогично системе апертурного зондирования управлять направлением телескопов на угловой отражатель приемной антенны спутника. Компенсация фазовых возмущений в атмосфере производится методом фазового сопряжения для каждого пучка отдельно. Возвращенный оптический сигнал анализируется с учетом ожидаемого доплеровского сдвига частоты, например, гетеродинным датчиком волнового фронта, который позволяет осуществить прямое измерение фазового распределения и среднего значения фазы на апертуре. Данные о волновом фронте используются для компенсации возмущений и фазирования пучков с помощью деформируемого адаптивного зеркала и специального подвижного плоского зеркала, перемещающегося поступательно.

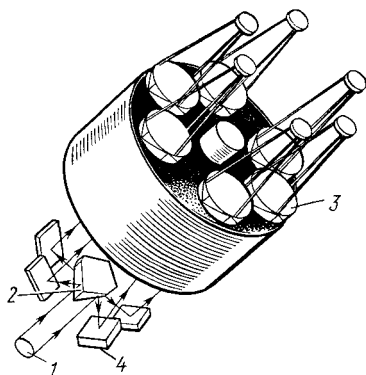


Рис. 52. Схема установки с синтезированной апертурой, работающей от одного генератора: 1 — излучение; 2 — пирамида с отражающими гранями; 3 — телескопы; 4 — зеркала

6.2. ОПТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Прогресс современной астрономии во многом связывается с увеличением размеров оптических телескопов. Большое главное зеркало телескопа выполняет две основные функции — обеспечивает сбор и концентрацию светового потока. Трудность создания крупногабаритного телескопа состоит в том, что необходима высокая точность изготовления и сохранения в процессе эксплуатации поверхности зеркала — появление волнистости, даже меньшей одного микрометра, может нарушить работоспособность телескопа. Эффективность традиционных способов увеличения апертуры телескопов к настоящему времени доведена до предела, и надежды многих астрономов обращены к составным секционированным зеркалам и адаптивной оптике. Методы и средства адаптивной оптики позволяют, во-первых, корректировать геометрию главного зеркала и, во-вторых, осуществлять компенсацию атмосферной тур-

булентности для получения высокой концентрации излучения в фокусе.

Для иллюстрации возможностей адаптивной оптики при ее внедрении в практику астрономии приведем пример, который дал в предисловии к сборнику статей [4] Э. А. Витриченко. Если оценивать эффективность телескопа при исследовании спектрального состава излучения слабых звезд как относительное количество света, попадающего в щель спектрографа (согласованную по размерам с разрешением фотоэмульсии), то для шестиметрового телескопа Специальной астрофизической обсерватории АН СССР она равна приблизительно 16%. Применение адаптивной оптики позволит сжать изображение звезды до размеров, меньших размеров щели спектрографа, и тем самым в шесть раз повысить эффективность телескопа.

Мы уже упоминали об успешной работе системы повышения резкости изображения на Ликской и Лейшнеровской обсерваториях (Калифорнийский университет, США) и системы коррекции волнового фронта RTAC (фирма Itek Corporation, США), использованной на Агассизской наблюдательной станции Гарвардской обсерватории (рис. 53).

Обсудим роль ограничений, которые имеют место в астрономической адаптивной оптике. До сих пор мы чаще всего обращались к примерам передающих оптических систем, когда объект подсвечивался оптическим лучом. Главной особенностью применения адаптивной оптики в астрономии является то, что здесь, как правило, имеют дело со слабым источником света. По мере ослабления источника определяющей составляющей ошибки компенсации возмущений становится ошибка, обусловленная статистикой дискретного (квантового) приема конечного числа фотонов (пуассоновским шумом). Желательно, конечно, увеличить время накопления фотоэлектронов для более уверенного приема, однако это время ограничено характерным временем изменения компенсируемых возмущений. Компенсация атмосферной турбулентности теоретически возможна для источников, имеющих визуальную звездную величину, равную $10 \dots 12^m$. Если же использовать звезду только для коррекции формы оптических поверхностей телескопа, то вре-

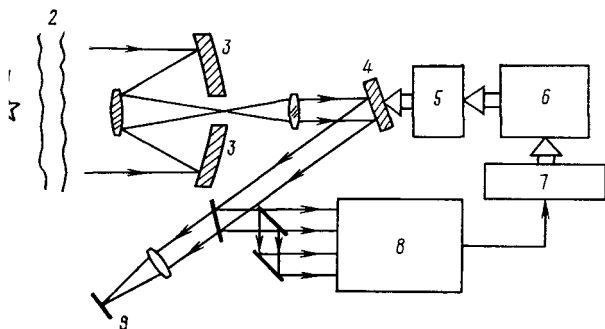


Рис. 53. Схема системы RTAC:

1 — источник излучения; 2 — атмосфера; 3 — телескоп; 4 — адаптивное зеркало; 5 — блок усилителей; 6 — ЭВМ; 7 — блок преобразователей; 8 — интерферометр сдвига; 9 — скорректированное изображение

мя накопления фотоэлектронов можно значительно увеличить (до 10... 100 с), что позволит адаптироваться по звезде 20-й величины.

Одной из особенностей применения адаптивной оптики в астрономии является немонохроматичность излучения небесных тел. Поэтому приходится использовать датчики волнового фронта, которые могут работать в белом свете, например датчики локальных наклонов типа датчика Гартмана. Строго говоря, в этом случае адаптивная оптика производит коррекцию разности оптических путей различных участков пучка излучения, а не фазы световой волны. Для различных длин волн, составляющих спектр излучения звезды, искажения волнового фронта отличаются друг от друга. Это вносит дополнительную хроматическую ошибку компенсации. Однако расчеты показывают, что для большинства используемых в настоящее время телескопов этой ошибкой можно пренебречь [16]. Исключения могут составлять очень крупные телескопы — диаметром более 5 м. Некоторое ухудшение положения возникает для больших зенитных углов ($\theta \geq 60^\circ$), что обусловлено различной степенью воздействия атмосферной рефракции на спектральные составляющие излучения. Рефракция приводит к тому, что лучи, прошедшие атмосферу, приходят в разные точки приемной апертуры. Для уменьшения рефракционной ошибки лучи при приеме могут быть вновь совмещены с помощью дисперсионного корректора.

Если зенитные углы не слишком велики, то полагают, что основной вклад в искажения дают нижние слои атмосферы (менее сотни метров), близкие к телескопу, и адаптивное зеркало размещают в изображении главного зеркала телескопа. Возрастание толщины турбулентного слоя при больших зенитных углах ведет к тому, что область искажений удаляется, а изображение этой области приближается к плоскости изображений телескопа. Это создает проблемы при размещении адаптивного зеркала.

Аналогичная ситуация возникает в высокогорных условиях, даже при вертикальном положении оптической оси, так как вклад высоких слоев атмосферы (до 20 км) сравним с вкладом слоев, близких к телескопу.

Практически это выливается в некоторое уменьшение поля зрения адаптивного телескопа до тех пор, пока не будет обеспечен изопланатизм приемной оптической системы. Поэтому характерный угол, внутри которого осуществляется компенсация турбулентности, для оптической астрономии сравнительно невелик (не более 1 угл. мин).

Обратимся к рассмотрению возможных схем построения телескопов с применением адаптивной оптики. Схема компенсации фазовых возмущений по опорной звезде с помощью небольшого адаптивного зеркала, помещенного в плоскости изображения главного зеркала телескопа, представлена на рис. 53. В этом случае производится коррекция как аберраций оптической системы, так и атмосферной турбулентности.

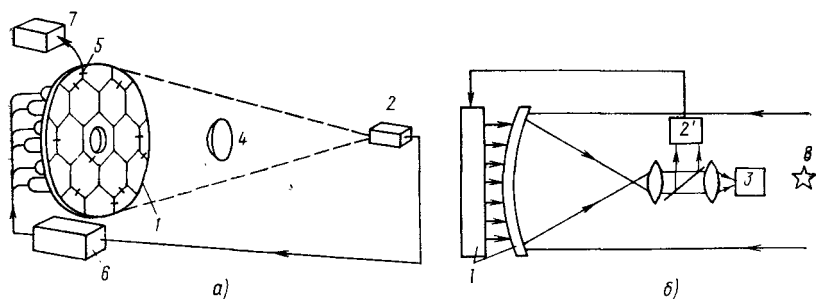


Рис. 54. Схема коррекции формы главного зеркала телескопа:

а — с использованием генератора излучения; *б* — по опорной звезде; 1 — главное зеркало; 2, 2' — датчики волнового фронта (2 — источником подсветки); 3 — датчик изображения; 4 — вторичное зеркало; 5 — датчики положения; 6 — блок управления; 7 — ЭВМ для вычисления положения секций; 8 — опорная звезда

Если требуется осуществлять только коррекцию оптики телескопа (по мере увеличения размера телескопа коррекция поверхности главного зеркала становится все более важной), то здесь могут быть применены два подхода — коррекция с использованием генератора когерентного излучения (рис. 54, *а*) и коррекция по опорной звезде (рис. 54, *б*).

Второй подход имеет определенные преимущества. К ним относятся: исключение проблемы разделения рабочего и контрольного пучков; отсутствие дополнительных элементов в оптической схеме; совпадение путей распространения рабочего и контрольного пучков практически на всем протяжении оптического тракта, а следовательно, отсутствие ошибок, связанных с воздушными неоднородностями внутри телескопа.

Учитывая, что время реакции адаптивной системы для коррекции формы значительно больше постоянной времени атмосферных флуктуаций, последние будут исключены из рассмотрения, так как среднее значение обусловленных ими возмущений равно нулю.

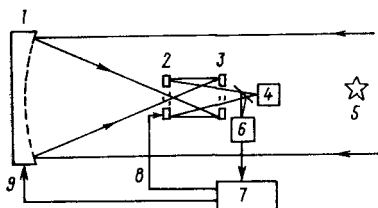


Рис. 55. Схема крупного адаптивного телескопа:

1 — секционированное главное зеркало; 2 — адаптивное зеркало (кольцевое); 3 — вторичное зеркало (контррефлектор) телескопа Грегори; 4 — датчик изображения; 5 — опорная звезда; 6 — датчик волнового фронта; 7 — ЭВМ; 8 — управление адаптивным зеркалом; 9 — управление главным зеркалом телескопа

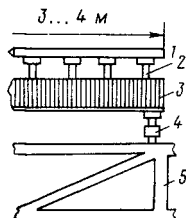


Рис. 56. Схема главного зеркала большого космического телескопа:

1 — отражающая пластина; 2 — деформирующие приводы; 3 — подложка зеркала с непрерывной поверхностью; 4 — приводы секций; 5 — объединяющая ферма

Для крупного зеркального телескопа может быть использована схема, представленная на рис. 55. Телескоп системы Грегори имеет секционированное главное зеркало, вогнутый контррефлектор и деформируемое адаптивное зеркало, расположенное в плоскости изображения главного зеркала.

Поступающая от датчика волнового фронта информация служит для управления секциями главного зеркала и непрерывной поверхностью небольшого адаптивного зеркала, которое осуществляет компенсацию ошибок управления секциями.

Большой интерес вызывает коррекция оптики крупного космического телескопа, поскольку здесь, как правило, проблемы компенсации атмосферной турбулентности не возникает.

Главное зеркало такого телескопа может быть очень большим (10...30 м). Оно составляется из секций размером 3...4 м, каждая из которых имеет деформируемую поверхность (рис. 56). Вся конструкция выполняется облегченной из современных материалов: отражающая пластина — из плавленого кварца, бериллия или карбида кремния, жесткое основание (подложка) секции — из пенистого стекла или графитоэпоксидной пористой плиты и, наконец, объединяющая всю конструкцию ферма — из графитоэпоксидных труб. Регулировка поверхности осуществляется секционными (по 3 на секцию) электромеханическими и деформирующими каждую секцию пьезоэлектрическими или иными прецизионными приводами. Такое зеркало допускает работу в ИК-диапазоне и, по оценкам, должно давать изображение, ограниченное только дифракцией, для длин волн около 30 мкм.

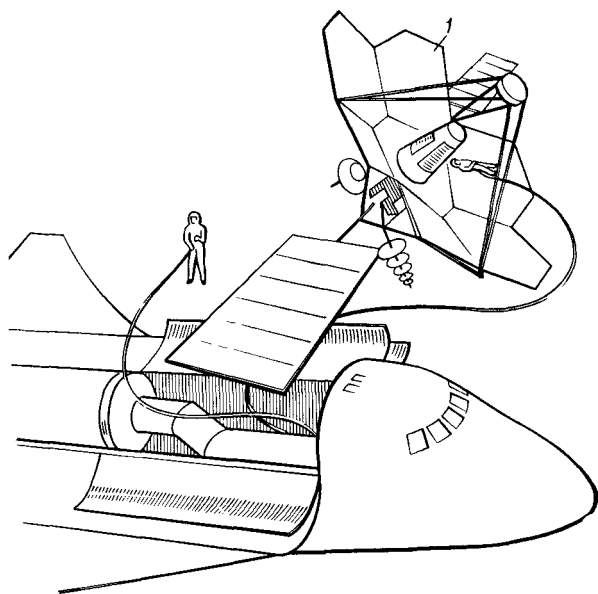
Разработка крупных телескопов космического базирования предусматривается NASA (США) в соответствии с программой «Шаттл» (рис. 57). В частности, планируется запуск в 1993 г. телескопа для диапазона длин волн $2\text{ мкм} \leq \lambda < 1\text{ мм}$. Этот уникальный оптический инструмент предназначен для изучения процессов образования звезд и эволюции галактик, а также исследования комет и планет.

Вероятно, одной из самых честолюбивых идей NASA является создание гигантского 30-метрового зеркала, предназначенного для использования в двух долгосрочных программах: для передачи светового луча в энергетических целях и целях разгона космических кораблей.

Одним из путей увеличения эффективной площади светосбора является применение синтезированной апертуры. В отличие от секционированного зеркала апертура телескопа формируется из нескольких отдельных телескопов. В § 6.1 мы уже кратко познакомились с подобными оптическими системами, работающими в педальном режиме. Световые потоки от каждого телескопа в режиме приема направляются в общий фокус, называемый фокусом уд. Фазирование телескопов может быть проведено по опорной везде с помощью интерферометров.

В отличие от секционированных или сплошных апертур адаптивных телескопов синтезированные апертуры работают в усло-

Рис. 57. Монтаж крупного телескопа (1) в космосе



виях меньшего отношения сигнал-шум. Теоретически это отношение уменьшается примерно в $\log_2 2N$ раз, где N — число элементарных апертур. Поэтому характерная звездная величина наблюдаемых объектов для телескопа с синтезированной апертурой не превосходит 11^m .

При значительных размерах элементарных апертур целесообразно ввести внутренний контур адаптации для каждого из телескопов в отдельности и внешний, осуществляющий фазирование телескопов аналогично оптическому передатчику с синтезированной апертурой, описанному в § 6.1.

Если размер каждого элементарного телескопа имеет значение порядка радиуса когерентности атмосферы (для видимого диапазона около 0,1 м), то осуществляется управление средней фазой для каждой апертуры. Размещение апертур на определенном интервале улучшает угловое разрешение телескопа. Однако разнесение элементарных апертур для наземного телескопа не может быть беспредельным и ограничивается не только конструктивными соображениями, но и наличием крупномасштабных характеристик турбулентности (так называемый внешний масштаб турбулентности имеет значение ~ 50 м). Что касается телескопов в космосе, то здесь ограничения на размер общей апертуры связаны только техническими трудностями обеспечения синфазности отдельных апертур. Как показывает практика, технические трудности рано или поздно преодолеваются и этот путь открывает широкую перспективу исследований Вселенной.

6.3. СВЕТОВЫЕ ПУЧКИ В УСТАНОВКАХ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА, СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ДРУГИХ ОБЛАСТЯХ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ

Остронаправленные световые пучки когерентного излучения все шире используются в промышленности, науке, медицине и т. д.

Известно, что одной из крупнейших проблем нашего столетия является проблема получения контролируемой термоядерной реакции для создания практически чистого и неисчерпаемого источника энергии. Известно также, что возможность нагрева вещества до термоядерных температур с помощью мощных световых импульсов легла в основу крупных разработок, которые ведут СССР, США, Франция, Япония и другие страны. В 70-х годах XX в. разработки в области получения термоядерной реакции были активизированы в связи с появлением идеи сверхвысокого сжатия высокотемпературной плазмы путем всестороннего облучения мишени. Для исследований в этой области были созданы мощные многокаскадным усилением импульса — «Дельфин» (СССР) и «Шива-Нова» (США). Выходная энергия таких установок составляет 10 кДж при длительности импульса 0,5... 1 нс. О масштабах проектов свидетельствуют, например, такие цифры: установка «Шива» имеет длину свыше 50 м и помещается в специальном здании; стоимость установки более 20 млн. дол.

В настоящее время как в СССР, так и в США интенсивно ведутся работы по использованию в управляемом термоядерном синтезе генераторов с более высоким КПД — на углекислом газе («Гелиос», 10 кДж; «Антарес», 40 кДж (США)).

Установки имеют сложный оптический тракт, включающий ряд пространственных фильтров и оптических усилителей для получения необходимой мощности светового импульса. Оптические элементы, усилители и даже воздушные промежутки тракта искажают волновой фронт излучения. Адаптивная оптика позволяет значительно (в 2—3 раза и более) увеличить плотность световой энергии на сжимаемой мишени.

Остановимся на примере оценки необходимой концентрации световой энергии на мишени для самонаведения с помощью ОВФ-зеркала. Система обращения целесообразна лишь в том случае, когда падающий на нее сигнал превышает собственные шумы системы. Согласно [5], для самонаведения требуется, чтобы плотность энергии на мишени значительно превосходила величину $(8\hbar \omega / (R_0 \kappa_0 \lambda^2)) (D/D_m)^2$, где R_0 , κ_0 , D_m — коэффициенты отражения, поглощения и диаметр мишени соответственно; ω — частота излучения; D — диаметр фокусируемого пучка. Для генератора на неодиме ($\lambda = 1,06$ мкм) при $R_0 = 0,1$; $\kappa_0 = 0,1$; $D/D_m \approx 10$ оказывается, что плотность световой энергии должна быть больше $2 \cdot 10^{-6}$ Дж/см².

Рассмотрим аспекты применения адаптивной оптики в активных системах оптической локации и связи. Заметим, что, останавливаясь на адаптивных оптических системах, работающих по отраженному от цели излучению подсветки, мы, как правило, считали отраженный сигнал достаточно сильным, чтобы можно было пренебречь содержащимися в нем шумами. Однако в оптической локации полезный сигнал чаще всего зашумлен как внешними, так и внутренними шумами. Поэтому в оптической локации и связи использование алгоритма фазового сопряжения в общем случае требует предварительной пространственно-временной фильтрации принимаемого сигнала для снижения влияния шума. Другая особенность работы адаптивных систем заключается в том, что существует некоторое конечное оптимальное число субапертур (число степеней свободы) адаптивного зеркала, зависящее от отношения сигнал-шум. Это нетрудно понять, если учесть, что точность измерения фазового возмущения убывает по мере увеличения шума. Измельчение приемно-передающих субапертур с ростом их общего числа при попутном ухудшении точности измерений волнового фронта отрицательно влияет на компенсацию возмущений. Приведем пример, представленный в [17]. Если условно оценивать степень «изрезанности» волнового фронта числом «пятен когерентности» N_n , укладываемых на апертуре, то зависимость числа Штреля от числа субапертур имеет вид, отраженный в табл. 5.

Таблица 5. Зависимость числа Штреля от числа субапертур

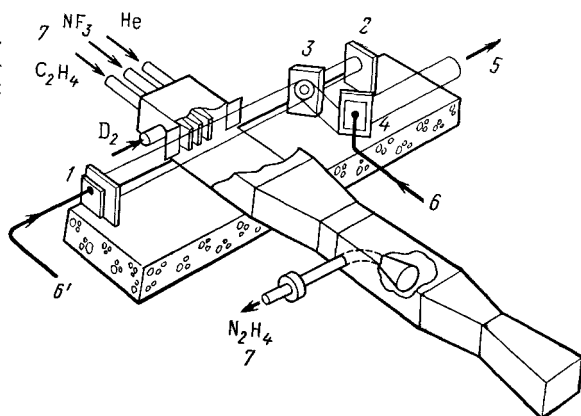
Отношение сигнал-шум	N_n	$N=3$	$N=10$	$N=30$
10	1	0,61	0,44	0,27
	10	0,14	0,20	0,17
10^2	1	0,73	0,83	0,75
	10	0,21	0,43	0,54

Из таблицы ясно видно, что увеличение числа субапертур с учетом конечного отношения сигнал-шум не всегда дает увеличение точности компенсации возмущений адаптивным зеркалом. Аналогичная картина наблюдается и для зеркала с непрерывной поверхностью. В приведенном примере оптимальное значение числа субапертур N при $N_n=10$ равно 13 (отношение сигнал-шум 10) и 33 (отношение сигнал-шум 10^2).

Для пассивных систем оптической локации задача компенсации ставится аналогично уже рассмотренной в приложении к оптической астрономии. Получение на приемнике изображения цели, ограниченного только дифракцией, позволяет с максимальной эффективностью выделить полезный сигнал на фоне паразитной засветки.

Значительный интерес представляет применение адаптивной оптики в неустойчивых резонаторах генераторов излучения. Сто-

Рис. 58. Типичная схема генератора (на DF) с поперечной прокачкой и неустойчивым резонатором: 1, 2 — зеркала резонатора; 3, 4 — поворотные зеркала; 5 — выходное излучение; 6, 6' — каналы управления адаптивными зеркалами при вне- и внутрирезонаторной коррекции соответственно; 7 — газовые потоки



имость таких установок (рис. 58) [22] достаточно высока, так что эффект улучшения качества излучения и энергетических показателей генератора с помощью адаптивной оптики весьма ощутим. Проблема качества излучения возникает из-за наличия неоднородностей в активной среде, в которой движутся газовые компоненты, возникновения ударных волн и областей различного давления. Кроме того, имеют место несовершенства оптики резонатора, напряжения в прозрачных окнах и т. д. Компенсация фазовых возмущений излучения может быть осуществлена с помощью адаптивного зеркала (4), размещенного вне резонатора. При размещении адаптивного зеркала (1) внутри резонатора управление фазой может приводить к увеличению выходной мощности генератора. Этот эффект был проиллюстрирован в эксперименте, проведенном Р. Стефенсом и Р. Линдом. Адаптивное зеркало было установлено внутри резонатора генератора на углекислом газе. Малая часть выходного излучения с помощью светоделителя направлялась на точечный фотоприемник. Система апертурного зондирования максимизировала сигнал на фотоприемнике путем управления адаптивным зеркалом. Одновременно измерялась выходная мощность генератора. Получено возрастание выходной мощности приблизительно на 60% (от 6,5 до 10,5 кВт). Авторы эксперимента полагают, что основной вклад в данный эффект вносит компенсация случайной разъюстировки зеркал резонатора, достигающей примерно 5 угл. сек. Таким образом, компенсация даже низших пространственных мод фазовых возмущений может оказывать значительное воздействие на характеристики генератора.

Улучшение расходимости пучка путем применения адаптивной оптики позволяет осуществить высокую концентрацию света и вкпе с улучшением энергетических характеристик может быть с успехом использовано в технологии при резке, сварке, сверлении отверстий, изготовлении микросхем и т. п. [18].

Весьма полезной может оказаться компенсация искажений, например, при проведении оптической сварки в вакуумированном объеме или камере с инертным газом через прозрачную стенку.

При осуществлении крупных проектов — систем передачи энергии на далекие расстояния, оптических телескопов и т. п. — оправдана разработка больших адаптивных систем, которые имеют множество каналов управления со сложной разветвленной структурой, используют быстродействующие ЭВМ и требуют штат сотrudников для своего обслуживания.

В сравнительно более простой и дешевой технике, например технологических установках, в настоящее время, по-видимому, целесообразно ограничиться и более простыми системами адаптивной оптики. К таким системам относятся системы компенсации низших мод искажений — наклонов волнового фронта, кривизны поля, астигматизма. Однако развитие и совершенствование адаптивной оптики в перспективе должно привести к созданию простых компактных и дешевых устройств, применение которых позволит практически полностью устранить возникающие фазовые возмущения.

С этой точки зрения наибольшую полезность может представлять создание стандартизованного адаптивного оптического модуля, подходящего для использования в установках различного профиля. Такой модуль мог бы включать небольшое монолитное пьезоэлектрическое зеркало, дифракционный ответвитель, приемник излучения и аналоговый или гибридный блок управления.

Потенциальным потребителем простой адаптивной техники является медицина. В настоящее время значительное число хирургических операций совершается с применением оптического ножа, который имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами хирургических инструментов (стерильность, низкое кровотоечение и т. д.).

Одной из самых идейно простых установок адаптивной оптики является адаптивный интерферометр. Известно, что интерферометры в настоящее время широко применяются при регистрации акустических колебаний, прецизионных измерениях длины (с точностью до долей микрометра), исследованиях поверхностей. Рассмотрим схему интерферометра Майкельсона, представленного на рис. 59. Разберем два примера. Пусть интерферометр должен регистрировать акустические колебания с частотой в несколько килогерц. Разность оптических путей между двумя лучами на фотоприемнике такова, что лучи интерферируют в фазе, т. е. на диафрагме приемника наблюдается светлая полоса. В реальных ус-

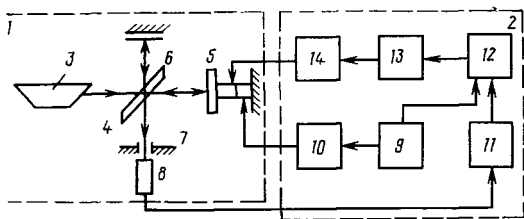


Рис. 59. Структурная схема адаптивного интерферометра: 1 — интерферометр; 2 — следящая система обратной связи; 3 — генератор излучения; 4 — светоделительная пластина; 5 — подвижное зеркало с пьезоприводом; 6 — исследуемый объект; 7 — экран с отверстием; 8 — фотоприемник (ФЭУ); 9 — генератор модуляции; 10 — усилитель; 11 — селективный усилитель; 12 — синхронный детектор; 13 — интегратор; 14 — высоковольтный усилитель

ловиях тепловое расширение элементов, колебания воздуха и случайные колебания установки с характерными частотами 100... 500 Гц вносят возмущения в разность оптических путей. Тогда должна вступить в действие адаптивная система, которая путем перемещения одного из зеркал постоянно отслеживает и компенсирует эти возмущения. За счет различия в частотах паразитного и полезного сигналов адаптивная система не воздействует на интерферометр при наличии полезных сигналов.

Вторым примером может служить точное измерение длины при перемещении суппорта фрезерного станка. В этом случае, разместив зеркало интерферометра на суппорте, можно точно регистрировать его положение во время движения. Адаптивная система устраняет влияние вибраций станка на интерферометр, при этом известная скорость движения суппорта позволяет осуществить частотное разделение полезного и паразитных сигналов.

Адаптивный интерферометр, действующий как одноканальная система апертурного зондирования, описан в [19]. Зеркало 5 в одном из плеч интерферометра размещено на пьезоприводе, имеющем корректирующую и модулирующую части. Модуляция производится гармоническим сигналом с частотой 4,5 кГц. Амплитуда колебаний зеркала 0,04λ. Промодулированный оптический сигнал, попадающий на ФЭУ 8, преобразуется в электрический и через селективный усилитель 11 направляется на синхронный детектор 12. В синхронном детекторе выделяется сигнал, который через интегратор 13 и высоковольтный усилитель следует на корректирующую часть привода. Интегратор служит для реализации алгоритма наискорейшего спуска, а усилитель — для достижения необходимой амплитуды перемещения зеркала. Подстройка осуществляется до тех пор, пока не будет достигнут экстремум сигнала на ФЭУ.

Данная система позволяет устойчиво компенсировать низкочастотные (до 50 кГц) изменения длин плеч интерферометра с амплитудой более 1,3 мкм и высокочастотные (≥ 600 Гц) с амплитудой около 0,13 мкм.

Более сложные интерферометры требуют установки в одном из плеч адаптивного зеркала с множеством степеней свободы, например при спекл-интерферометрии шероховатых поверхностей, с целью повышения отношения сигнал-шум на фотоприемнике. Каждое из пятен возникающей спекл-структуры, интерферирующей с опорным адаптированным пучком, имеет характерный размер, равный радиусу корреляции рассеянного светового поля. Если область локальной деформации адаптивного зеркала, установленного в плече опорного пучка интерферометра, сравнима с размером пятна, то выигрыш в отношении сигнал-шум составляет приблизительно $\sqrt{N}$ раз, где N — число степеней свободы адаптивного зеркала.

Аналогичным образом могут быть решены задачи компенсации искажений в гетеродинном интерферометре с большой базой, ког-

да существенный вклад в процесс измерений вносит турбулентная атмосфера.

Итак, мы познакомились с элементами и системами адаптивной оптики. Для закрепления знакомства приведем пример инженерного расчета конкретной адаптивной оптической системы. Пусть нам необходимо создать воздушный оптический канал связи на рабочей длине волны $\lambda=0,6$ мкм. Приемное устройство удалено от нас на расстояние $L=10$ км и имеет размер приемной антенны $2r=0,1$ м.

1. Полагая, что с помощью адаптивной оптики нам удастся почти полностью приблизить систему к идеальной, находим размер D апертуры передающей антенны. Для этого воспользуемся формулой для размера дифракционного пятна идеальной системы

$$2r = \frac{2,44\lambda L}{D},$$

откуда $D \approx 0,15$ м.

2. Оценивая радиус когерентности атмосферы

$$r_0 = (0,423 \cdot 4\pi^2 \cdot C_n^2 L / \lambda^2)^{-3/5}$$

для случая сильной турбулентности $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-16}$ м^{-2/3}, получаем $r_0 \approx 5$ см.

3. Для расчета дисперсии фазовых возмущений в атмосфере воспользуемся формулой Д. Фрида

$$\sigma_s^2 \approx 1,013 (D/r_0)^{5/3},$$

откуда $\sigma_s^2 \approx 6,5$.

4. Среднее число Штреля, характеризующее мощность сигнала на приемной апертуре, имеет вид

$$\langle I^* \rangle \approx \exp(-0,3\sigma_s^2 N^{-5/6}).$$

Положив эффективность системы по Штрелю равной 0,8, т. е. $\langle I^* \rangle = 0,8$, находим $N \approx 14$. Таким образом, можно составить на адаптивном зеркале квадратную сетку приводов 4×4 или гексагональную $N=19$ (с некоторым запасом).

5. Расстояние между приводами на зеркале полагается равным 3 см. Диапазон перемещения приводов находится из среднеквадратичного значения фазовых возмущений $\sigma_s \approx 0,8\pi$. Отсюда амплитуда возмущений составляет $3\sigma_s$, а диапазон перемещений $|\xi| < 0,36$ мкм.

6. Необходимая полоса пропускания частот системы должна составлять не менее

$$\omega_c \approx \left(\frac{5,5\sigma_s^2}{\ln \langle I^* \rangle^{-1}} \right)^{3/5} \frac{v}{D}.$$

Отсюда при скорости поперечного ветра $v=10$ м/с получаем полосу $\omega_c = \omega_c/2\pi \approx 250$ Гц.

7. Для системы связи целесообразно использовать простую и дешевую систему апертурного зондирования с частотами модуляции более $10\omega_c$, например 5...23 кГц для $N=19$ каналов. Ожидаемое быстродействие такой системы 3...4 мс.

Получение обратного сигнала можно реализовать различными путями: организацией радиоканала, с помощью кабельного соединения приемника и пере-

датчика, переотражением оптического сигнала при имеющемся запасе мощности и т. п. Необходимо только, чтобы полоса пропускания частот канала обмена была бы не ниже 23 кГц.

В результате работы системы мощность принятого сигнала возрастает приблизительно в 10^3 раз. Если учесть, что пороговая мощность приемника (ФЭУ) составляет около 10^{-10} Вт при полосе частот 50 ... 100 МГц, то источник когерентного излучения в 50 мВт сможет осуществлять передачу даже в случае сильной дымки в атмосфере.

Приведенный пример является в достаточной мере умозрительным и имеет прежде всего иллюстративный характер. Разработчик системы может предпочесть более мощный источник или другую рабочую длину световой волны, однако когда исчерпает традиционные методы повышения эффективности системы, он обратится к компенсации искажений света на воздушной трассе, т. е. к адаптивной оптике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Знакомство с изложенным выше материалом убеждает в том, что адаптивная оптика — синтетическое направление, вобравшее в себя достижения множества областей науки и техники. Вызванное практической потребностью объединение ряда дисциплин привело к качественно новым физическим возможностям оптики. Недаром стали известными слова Дэвида Фрида: «Так же как о погоде, многие имели обыкновение рассуждать о турбулентности земной атмосферы, но никто не пытался бороться с ней». Однако теперь ситуация быстро меняется. Оптическая техника достигла такого уровня развития, что у нас появилась возможность как-то противостоять вредному влиянию турбулентности на распространение оптического сигнала. Это «как-то» получило название «адаптивная оптика».

В этот же период было открыто новое физическое явление, решающее те же задачи — обращение волнового фронта. Таким образом, за короткое время ученые и инженеры были вовлечены в исследование физических процессов распространения светового поля в условиях компенсации его искажений.

Наряду с принципиальной, физической стороной проблемы развивалась техника адаптивной оптики. Этап ее бурного развития породил массу оригинальных технических решений. К настоящему времени этот процесс стабилизировался и поиск в большинстве случаев перенесен в область технологии.

Адаптивная оптика делает первые шаги из лабораторий в народное хозяйство. По-видимому, на этом пути надо вовремя перейти от отдельных лабораторных образцов к унифицированному ряду элементов и систем. Прежде всего это касается сравнительно простых устройств массового промышленного производства — технологических установок, оптических генераторов, интерферометров, медицинской аппаратуры и т. п. Что касается уникальных проектов, то их осуществление потребует значительных усилий, однако независимо от области применения адаптивная оптика позволит полностью реализовать потенциальные возможности современной оптической техники.

Адаптивная оптическая система, как правило, является результатом кооперации ученых, специалистов различного профиля. «Под крышей» адаптивной оптики стыкуются разделы статистической

радиофизики и теории управления, квантовой электроники и схемотехники, нелинейной оптики и технологии, оптоэлектроники и прикладной математики, вычислительной техники и теории упругости. В связи с этим авторы сочли целесообразным дополнить список литературы специальной краткой библиографией [23—35], которая может пригодиться при создании конкретных систем. Эта библиография отражает уровень современной техники, используемой в адаптивных оптических системах. В то же время адаптивная оптика требует развития технических компонентов с целью достижения более высокой эффективности и расширения функциональных возможностей, а именно: создания надежных ответвителей излучения, быстродействующих высоковольтных усилителей, цифровых пьезопроводов; повышения чувствительности и надежности приемников излучения, быстродействия цифровых вычислительных машин.

Знакомя читателя с адаптивной оптикой, авторы стремились привлечь внимание различных специалистов к ее проблемам, показать, какое широкое поле для деятельности открывается перед вступающим в данную область. Адаптивная оптика не стоит на месте. Можно указать перспективные направления ее развития. К ним относятся:

- разработка адаптивных фазированных решеток генераторов;
- разработка исполнительных элементов на основе управляемых транспарантов;

- техническое освоение ОВФ-зеркал;

- повышение мощности генераторов с применением внутррезонаторной компенсации искажений;

- решение проблемы обеспечения устойчивости систем, в том числе при наличии помех;

- введение принципов оптимального синтеза систем.

Несмотря на большое число представленных известных технических решений, необходимо иметь в виду «подводные камни», лежащие на пути создания систем и элементов адаптивной оптики. На некоторые из них указано в тексте. Если все же читатель всерьез задумается о применении методов и средств адаптивной оптики в конкретном изделии, авторы будут считать свою задачу выполненной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Адаптивная оптика // Природа. — 1982. — № 10. — С. 39—45.
2. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
3. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. — М.: Наука, 1985. — 240 с.
4. Адаптивная оптика: Пер. с англ. / Под ред. Э. А. Витриченко. — М.: Мир, 1980. — 456 с.
5. Беспалов В. И., Пасманик Г. А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. — М.: Наука, 1986. — 136 с.
6. Адаптация в информационных оптических системах / Под ред. Н. Д. Устинова. — М.: Радио и связь, 1984. — 344 с.
7. Известия вузов. Физика. — 1985. — Т. 28, № 11. Атмосферная адаптивная оптика: Тем. вып. — 124 с.
8. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. — Новосибирск: Наука, 1986. — 248 с.
9. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинамирование / Под ред. Н. Д. Устинова. — М.: Наука, 1985. — 288 с.
10. Экспериментальное исследование фазосопреженной адаптивной системы с составными управляемыми зеркалами / Н. Н. Артамонов, Г. А. Киселев, С. Н. Козлов, А. С. Печенов // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1984. — Т. 48, № 7. — С. 1415—1419.
11. Статические и адаптивные элементы силовой оптики / В. В. Аполлонов, В. И. Бородин, И. В. Гончаренко и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1984. — Т. 48, № 8.
12. Кислов В. И., Тараненко В. Г. Показатели качества и принципы оптимального управления исполнительным элементом фазосопреженных адаптивных систем // Радиотехника и электроника. — 1986. — Т. 31, № 11. — С. 2187—2190.
13. Расчетно-экспериментальное исследование адаптивной системы апертурного зондирования / А. А. Маслеников, С. В. Пикулев, О. И. Шанин и др. // Тр. IV совещания по атмосферной оптике. — Томск. — 1988. — С. 133—135.
14. Сидорович В. Г. К теории «бриллианзовского» зеркала // Журн. техн. физики. — 1976. — Т. 46, № 10. — С. 2168—2174.
15. Зельдович Б. Я., Шкунов В. В. Спеклон // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1984. — Т. 48, № 8. — С. 1545—1549.
16. Мейнел А. Б. Обзор технических возможностей для создания телескопов будущего // Оптические телескопы будущего. — М.: Мир, 1981. — С. 20—31.
17. Бакут П. А., Киракосянц В. Е., Логинов В. А. Оптимизация и потенциальные характеристики управляемых (адаптивных) оптических систем // Изв. вузов. Физика. — 1985. — Т. 28, № 11. — С. 64—77.
18. Мощные газоразрядные CO₂-лазеры и их применение в технологии / Г. А. Абельснитов, Е. П. Велихов, В. С. Голубев и др. — М.: Наука, 1984. — 106 с.
19. Адаптивный интерферометр / Б. С. Гаврюшенко, А. В. Курейков, В. Н. Мозговой и др. // Оптико-механич. пром-сть. — 1985. — № 8. — С. 27—29.
20. Diamond Turned Deformable Mirror / P. Goede et al. // Proc. SPIE. — 1983. — Vol. 365. — P. 138—145.

21. Chiarappa, Claysmith C. Deformable mirror surface control techniques // J. of Guidance and Control. — 1981. — Vol. 4, № 1. — P. 20—25.
22. Hogge C. B. Adaptive Control in Optical Systems // Proc. Amer. Contr. Conf., Seattle. — 1986. — P. 2124—2128.
23. Цеснек Л. С., Сорокин О. В., Золотухин А. А. Металлические зеркала. — М.: Машиностроение, 1983. — 231 с.
24. Витриченко Э. А., Прохоров А. М., Трушин Е. В. Методы изготовления астрономической оптики. — М.: Наука, 1980. — 194 с.
25. Богомолов П. А., Сидоров В. И., Усольцев И. Ф. Приемные устройства ИК-систем. — М.: Радио и связь, 1987. — 208 с.
26. Аксененко М. Д., Бараиочников М. Л. Приемники оптического излучения. Справочник. — М.: Радио и связь, 1987. — 296 с.
27. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествин В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы. — М.: Радио и связь, 1982. — 450 с.
28. Виноградов В. И. Информационно-вычислительные системы: Распределенные модульные системы автоматизации. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 336 с.
29. Современный компьютер: Пер. с англ./Под ред. В. М. Курочкина. — М.: Мир, 1986. — 212 с.
30. Уан К. Перспективные методы параллельной обработки и архитектура суперЭВМ // ТИИЭР. — 1987. — Т. 75, № 10. — С. 4—41.
31. Алексеев А. Г., Войшвилло Г. В., Трисахо И. А. Усилительные устройства. — М.: Радио и связь, 1986. — 160 с.
32. Кибакин В. М. Основы ключевых методов усиления. — М.: Энергия, 1980. — 232 с.
33. Распространение лазерного пучка в атмосфере/Под ред. Д. Стробена; Пер. с англ. под ред. В. Е. Зуева, В. Л. Миронова. — М.: Мир, 1981. — 416 с.
34. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. — М.: Наука, 1981. — 640 с.
35. Проектирование оптических систем/Под ред. Р. Шениона, Дж. Вайанта; Пер. с англ. под ред. И. В. Пейсахсона. — М.: Мир, 1983. — 432 с.