

Основные постулаты адаптивной коррекции искажений волнового фронта в крупногабаритных оптических системах

03, март 2014

DOI: 10.7463/0314.0700488

проф., д.т.н. Сычев В. В.

УДК 520; 389.17

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

viktorsychev@list.ru

Введение

Научные достижения современной астрофизики неразрывно связаны с интенсивным развитием астрономических средств наблюдения нового поколения. Основным направлением развития является создание сверхбольших оптических телескопов (диаметр главного зеркала более 20 м), использование средств адаптивной оптики для реализации предельных по качеству получаемого изображения характеристик оптических инструментов, апертурный синтез, создание автоматизированных средств обработки изображений и т.д.

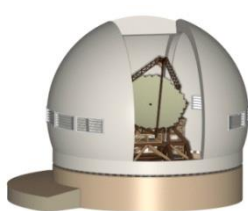
Главной тенденцией развития оптического телескопостроения всегда было стремление увеличить проникающую способность телескопа. Реальным путем решения данной проблемы является повышение качества получаемого изображения (уменьшение углового размера изображения в реальных условиях действия искажающих факторов) и увеличение диаметра главного зеркала. Этому противодействуют имеющие место в реальных условиях эксплуатации телескопов различные искажающие факторы или помехи, а также усложнение технологии производства крупных зеркал [1].

В работах [2,3,4] показано, что увеличение диаметра главного зеркала не может быть сколь угодно большим, т.к. ограничивается возможностью создания необходимой конструкции и существующим уровнем технологии производства. Расчеты показывают, что если оценивать телескоп по критерию количества информации, получаемого с первичного изображения, то диаметр телескопа на ближайшие 20 лет не может превышать 25 метров. Поэтому созданию телескопов с диаметрами от 30 до 100м должно предшествовать проведение работ по поиску путей существенного повышения качества получаемых изображений. Попытки реализации в настоящее

время 30-, 50-, 100 метровых оптических телескопов не приведут к увеличению первичной информации из-за неблагоприятного бюджета ошибок и, в случае интерференции, резкого падения числа градаций яркости наблюдаемых объектов. Финансирование таких проектов, как у нас в России говорят, - «деньги на ветер».

1. Особенности подхода к решению задачи снижения влияния искажающих факторов на качество изображения в телескопе

На качество изображения в телескопе влияют три основные группы искажающих факторов: физические, технологические и инструментальные [5]. Наиболее эффективным методом борьбы с влиянием искажающих факторов на качество изображения в телескопе является их минимизация (путем выбора места установки телескопа, выбором рациональной оптической схемы, созданием материалов, новых технологий, совершенствованием конструкции, разгрузкой зеркал, выбором монтировки и т.д.), а затем – адаптивная компенсация оставшихся искажений. Поскольку технологические возможности изготовления оптических зеркал ограничены размером до 6-8 метров, то увеличение диаметра главного зеркала может быть осуществлено, главным образом, созданием крупногабаритных астрономических комплексов (рис.1.) с составным главным зеркалом (СГЗ) (НЕТ, SALT, GMT, АСТ и др.).



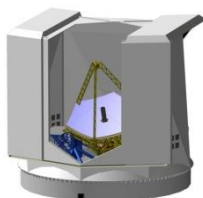
GMT

Диаметр СГЗ:30 м



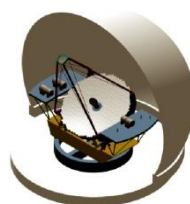
АСТ-25

Диаметр СГЗ:25 м



EURO-50

Диаметр ГЗ:50 м



CELT

Диаметр ГЗ:30 м

Рис. 1.1. Проекты сверхбольших астрономических телескопов с СГЗ.

Если сравнивать возможные монтажки телескопов, то оказывается, что телескопы с СГЗ имеют совокупную инструментальную ошибку, значительно меньшую, чем инструментальная ошибка телескопов типа MMT, VLT, LBT и др. Несомненным преимуществом телескопов с СГЗ является также возможность практической реализации фазировки составной апертуры, так как сфазировать СГЗ значительно проще и надежнее, чем пытаться сфазировать пучки от отдельных телескопов.

Таким образом, анализ зарубежных материалов на основании публикаций и участия российских специалистов в международных научных симпозиумах и конференциях подтверждает перспективность отечественной концепции создания телескопов 25-метрового класса. Она учитывает имеющийся на сегодняшний день зарубежный опыт (как положительный, так и отрицательный), но отличается подходом, имеет ряд преимуществ и требует существенно меньших финансовых затрат.

Как отмечалось ранее в [1], искажающие факторы многообразны в своем проявлении и в реальных сложных оптических системах многие из них действуют на волновой фронт излучения одновременно.

Наряду с информационными системами, использующими адаптивные средства коррекции ВФ с целью повышения качества изображения, широкое распространение получили формирующие оптические системы для передачи энергии лазерного излучения на расстояние, также использующие адаптивные средства для снижения уровня потерь путем коррекции ВФ излучения в условиях действия искажающих факторов [6].

2. Адаптивные средства коррекции искажений ВФ излучения в информационных оптических системах

В информационных оптических системах, каковым в частности является телескоп АСТ-25, используются адаптивные средства, которые способны значительно уменьшить вклад искажений, вызванных атмосферной турбулентностью и которые способны исправлять крупномасштабные низкочастотные инструментальные погрешности, вызываемые несовершенством конструкции телескопа. Среднеквадратичный размер атмосферного уширения изображения был принят равным 0,5 угл.с., что соответствует лучшим астроклиматическим условиям астрономических обсерваторий.

Для телескопов 25-метрового класса ошибки, связанные с конструкцией телескопа и негативным влиянием ветровых нагрузок, имеют первостепенное значение. Так, в крупногабаритном оптическом телескопе имеется целый ряд трудноустраняемых причин, таких как гравитационные, тепловые и вибрационные деформации конструкции, переменные ветровые нагрузки и т.п., которые вызывают крупномасштабные низкочастотные искажения ВФ

принимаемого излучения. А управляемое составное главное зеркало эффективно используется как компенсатор этих искажений в системе адаптивной коррекции.

Благодаря «ноу-хау» проекта супертелескопа АСТ-25, заключающемуся в ряде оригинальных технических решений в части

- новой концепции построения телескопа, позволившей исключить существенные искажающие факторы,

- новых алгоритмов управления и коррекции искажений,

- «нерасстраиваемой» системы контроля пространственного положения элементов корректора,

- «ранжирования» коррекции по степени влияния искажающих факторов,

- минимизации влияния искажающих факторов, существенно снижающей динамический диапазон этого влияния и повышающей точность адаптивной коррекции искажений,

- новой конструкции узлов крепления управляемых элементов корректора,

- новых приводов микроперемещений, у которых отсутствуют такие искажающие факторы как тепловые и электрические поля, вибрации, нежесткие элементы конструкции и т.д.

достигнуты предельно возможные характеристики астрономического комплекса, не достижимые никакими другими оптическими средствами, построенными на известных традиционных принципах.

Кроме того, отечественная концепция позволяет воспользоваться одним из наиболее эффективных, по нашему мнению, путей создания крупногабаритных телескопов, заключающимся в отказе от создания “абсолютно жесткой и нерасстраиваемой” конструкции, пассивно обеспечивающей отъюстированное состояние оптики телескопа в любом режиме работы. Конструкция должна лишь иметь остаточные деформации такого уровня, влияние которых в состоянии эффективно скомпенсировать адаптивная система, использующая в качестве корректора элементы СГЗ, а также управляемое вторичное зеркало.

Такая адаптивная система, прежде всего, предназначена для компенсации в реальном времени определенного спектра систематических и случайных возмущений, охватываемых ее диапазоном, пространственным разрешением и быстродействием.

3. Основные проблемы коррекции искажений ВФ излучения в передающих оптических системах

В передающих оптических системах для того, чтобы доставить энергию лазерного излучения на удаленный объект, например, для энергетической подпитки искусственных спутников Земли (ИСЗ), как низкоорбитальных, так и геостационарных, необходимо было преодолеть не только искажающее влияние факторов, присущих информационным оптическим системам, но и дополнительно найти пути преодоления целого ряда новых проблем. Главные из них:

- влияние лазерного излучения на элементы конструкции и среду распространения и, вследствие этого, – обратное влияние элементов конструкции и среды распространения на ВФ передаваемого излучения;

- отсутствие опорного источника излучения на длине волны передаваемого лазерного излучения, необходимого для осуществления методов адаптивной коррекции искаженного ВФ;

- наличие в передающих системах дополнительных искажающих факторов, присущих только лазерным системам.

К таким искажающим факторам следует отнести:

- протяженность оптического тракта из-за необходимости пространственного разнесения лазерного источника большой мощности с большим числом согласующих оптических элементов;
- тепловое самовоздействие мощного лазерного излучения в канале транспортировки излучения до ввода его в формирующую оптическую систему;
- нестабильность пространственно-временных характеристик самого лазерного источника излучения, ухудшающая условия прохождения излучения как внутри оптического тракта, так и в свободной атмосфере;
- тепловые неоднородности и термодформации.

4. Основные постулаты адаптивной коррекции ВФ в крупногабаритных оптических системах

Каждый разработчик сложных оптических систем рассчитывает на успех в своей работе и выбирает алгоритм действий по достижению поставленной задачи. Сначала на основе опыта и интуиции он формулирует некую систему утверждений, которую принимает за основу при проектировании прибора. Т.е. создает основные постулаты разработки конкретного прибора.

Для чего это нужно? В любом деле встречаются проблемы. Умный человек знает, как надо делать, чтобы их преодолеть и достичь желаемого результата. Опытный человек на основе собственных проб и ошибок знает, как не надо делать. А мудрый человек знает, как надо сделать так, чтобы этих проблем не возникало вовсе на пути достижения нужного результата. Так вот

основные постулаты адаптивной коррекции помогают разработчику делать то, что надо и не делать того, чего не надо.

Применительно к адаптивным средствам компенсации и коррекции искажений ВФ излучения можно отметить, что только в последние годы пришло понимание и осознание роли и значения адаптивной оптики в деле создания эффективных оптических систем. Об этом свидетельствует, например, ряд статей [6, 7, 8], в которых четко сформулированы понятия адаптивной оптики, активной оптики, а также их основные задачи. В них, в частности, говорится о том, что активная оптика используется в случаях, когда требуется поддерживать исходные параметры оптических элементов

От активной оптики адаптивные системы отличает то, что коррекция искажений ВФ излучения происходит в реальном времени по всей совокупности искажающих факторов (не только по влиянию атмосферы) с быстроедействием на порядок превышающем действие самих искажений. При этом оценка качества коррекции производится по критерию качества первичного изображения.

Коррекция непрерывно учитывает информацию о текущих пространственных, температурных, временных и юстировочных параметрах оптической системы, обеспечивая поддержание высокого качества изображения в условиях действия искажающих факторов.

Один из вариантов блок-схемы адаптивной оптической системы крупногабаритного телескопа с учетом предложенных постулатов адаптивной коррекции искажений ВФ представлен на рисунке 4.1..

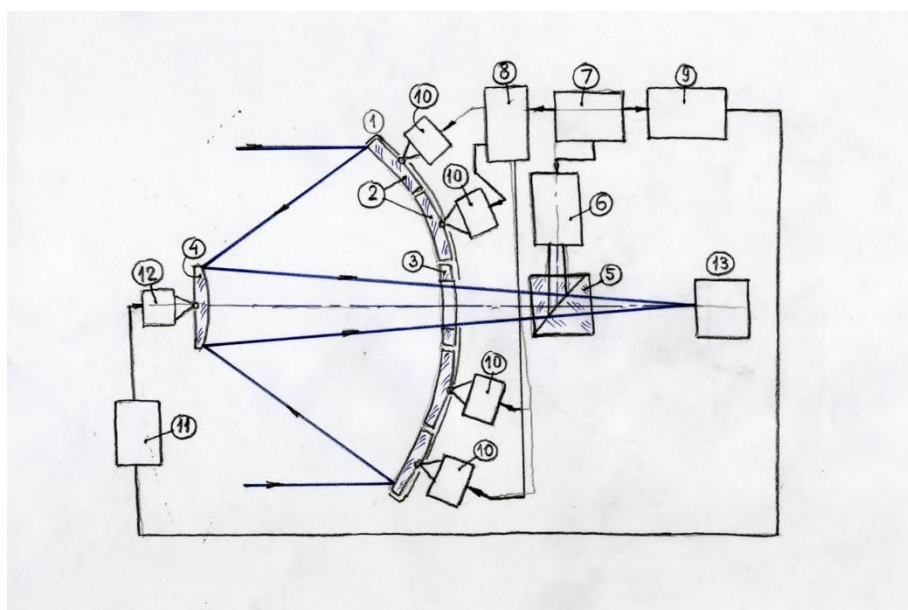


Рис. 4.1. Вариант блок-схемы адаптивной оптической системы крупногабаритного телескопа с учетом предложенных постулатов адаптивной коррекции искажений ВФ.

1 – составное главное зеркало (СГЗ); 2 – элемент (сегмент) СГЗ; 3 – опорное зеркало; 4 – вторичное зеркало (ВЗ); 5 – светоделитель (куб-призма); 6 – система контроля пространственного положения оптических элементов (ВЗ и элементов СГЗ); 7 – блок выработки сигналов рассогласования пространственного положения оптических элементов по 3-м координатам; 8 – блок выработки сигналов управления приводами микроперемещений элементов СГЗ; 9 – блок выработки сигналов управления приводами микроперемещений ВЗ; 10 – привода микроперемещений элементов СГЗ; 11 – приводами микроперемещений ВЗ; 12 – приемно-регистрирующее устройство;

Прежде, чем приступить к рассмотрению физического смысла адаптивной коррекции, следует помнить об очевидных положениях функционирования приборов. Любой прибор должен выполнять свои функции в условиях реального действия окружающей среды. Успех разработки приборов будет зависеть от того, насколько правильно будут учтены эти условия. Мерой отступления от реальных условий действия прибора является система допущений, принятая разработчиком.

1. Поэтому самым **первым постулатом** должно быть достаточно очевидное утверждение, что **воздействие окружающей среды на работу прибора существует, а различная форма этого воздействия равновероятна по своему проявлению.**

Могут возразить, что это известно каждому. Однако опыт разработки сложных оптико-электронных приборов говорит о том, что этот постулат во многих случаях игнорируется. Например, до сих пор существует заблуждение, что кроме воздействия турбулентности атмосферы на качество изображения других существенных воздействий не существует.

Следуя первому постулату, нужно руководствоваться так называемым всеобщим законом: «Все зависит от всего!» (шутливо называемым «законом Сидорова»). Степень этой зависимости может быть различной. В ряде случаев она может быть пренебрежимо малой. Кроме того, она может быть изменчивой, непостоянной. Например, влияние атмосферы зависит от времени года, времени суток, параметров атмосферы и т.д.

2. **Второй постулат: адаптивной коррекции должен предшествовать этап минимизации искажений ВФ.** На адаптивную коррекцию следует возлагать только те остаточные искажения, которые не могут быть устранены любым другим способом. Это позволит значительно снизить динамический диапазон адаптивного управления и повысить эффективность адаптивной коррекции.

3. **Третий постулат: минимизация искажений ВФ должна производиться в трех основных направлениях** для оптимизации условий работы средств адаптивной коррекции:

- уменьшение количества искажающих факторов,

- уменьшение абсолютных величин искажений,
- выравнивание влияния отдельных искажающих факторов на ошибки ВФ (перераспределение допусков на отдельные составляющие бюджета ошибок).

4. Четвертый постулат: эффективность адаптивной коррекции искажений ВФ целесообразно характеризовать мерой отступления формы скорректированного ВФ от идеальной или коэффициентом относительного использования излучения $\tilde{\eta}$ [5].

$$\tilde{\eta} = \frac{\int_T D_{Ш}(t) R^{-2}(t) dt}{\int_T R^{-2}(t) dt}.$$

Где T – время передачи энергии излучения,

$R(t)$ – траектория движения объекта излучения,

$D_{Ш}$ – параметр Штреля.

$$D_{Ш} = \frac{J}{J_0},$$

где: J – максимальная интенсивность в пятне с учетом всех искажений;

J_0 – максимальная интенсивность при отсутствии искажений.

5. Пятый постулат: адаптивная коррекция должна быть двухуровневой, так как искажающие факторы можно разделить на две группы: факторы, поддающиеся изменению в процессе создания телескопа (группа А) и факторы, на которые практически воздействовать нельзя (группа Б). Поэтому адаптивные средства телескопа должны содержать две системы – систему автоматической стабилизации исходной юстировки и заданных параметров (САС) и систему адаптивной коррекции или адаптивного управления (САУ).

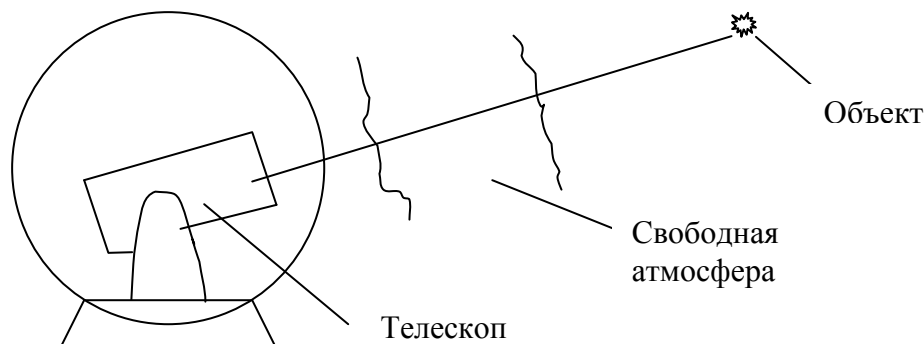


Рис. 4.2. Схема информационной оптической системы.

Группа А относится к телескопу с укрытием (рис.4.2.) и включает в себя такие факторы, как деформация конструкции под действием собственного веса (Д), термдеформации (ТД), абберации оптической системы (АБ), ошибки изготовления оптики (И), ошибки юстировки (Ю), стабильность юстировки (СЮ), атмосфера внутри телескопа (АВТ), ветровые нагрузки (ВН), конвективные потоки (КП), павильонные эффекты (ПЭ), вибрации от приводов (В), нутации оси (Н) и др.

Группа Б относится к свободной атмосфере и включает в себя турбулентность атмосферы (ТА), тепловые неоднородности (ТН), тепловое самовоздействие (ТС) и др.

Для передающих оптических комплексов в группу А добавляются ошибки юстировки лазера (ЮЛ), стабильность пространственно-временных характеристик излучения лазера (СПВХЛ), стабильность юстировки лазера (СЮЛ), тепловое самовоздействие канала транспортировки мощного лазерного излучения (ТСКТ) и пр.

6. Шестой постулат: система адаптивной коррекции должна быть многоконтурной, так как физическая природа искажающих факторов различна, а потому различные характеристики этих искажений требуют, как правило, различных исполнительных средств коррекции.

7. Седьмой постулат: адаптивная коррекция искажений должна производиться преимущественно во входном зрачке, так как качество изображения зависит от фазовых соотношений именно во входном зрачке. Перенос адаптивной коррекции в сопряженные плоскости может увеличить количество искажающих факторов, спектр корректируемых пространственных частот и динамический диапазон корректируемых искажений, снижая, тем самым, эффективность адаптивной коррекции.

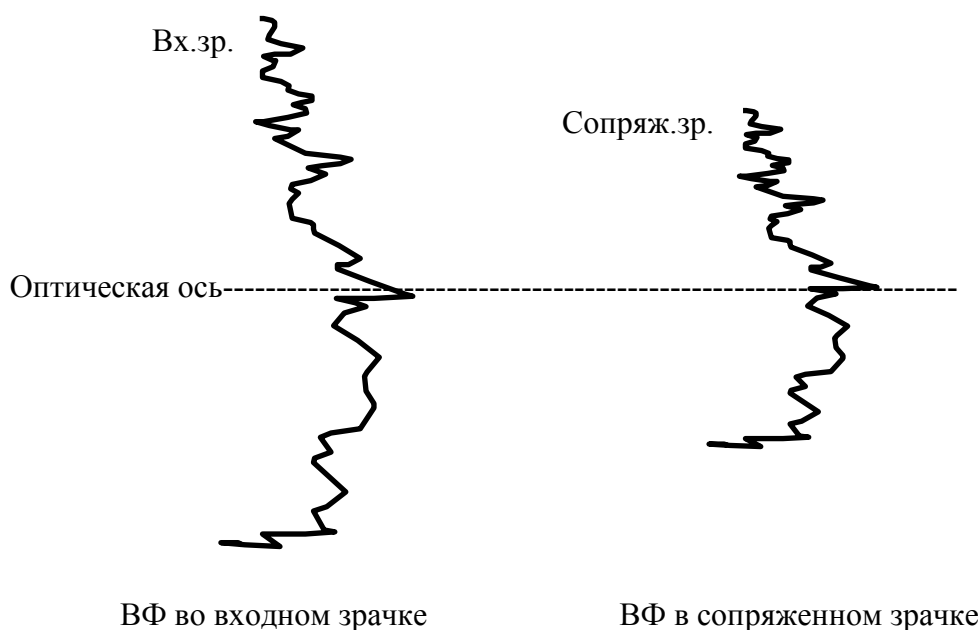


Рис. 4.3. К вопросу фазовой коррекции в сопряженном зрачке.

В самом деле, если представить процесс переноса ВФ из входного зрачка в сопряженный как изменение масштаба апертуры и его пространственного расположения (рис.4.3.), то становится ясным, что это приведет к новым недостаткам фазовой коррекции в сопряженном зрачке, а именно,

- увеличится динамический диапазон искажений пропорционально масштабу изменения апертуры в сопряженном зрачке,

- увеличится количество искажающих факторов за счет искажающей среды сопряженного зрачка и переходом мелкомасштабных несущественных для входного зрачка искажений в разряд крупномасштабных существенных для сопряженного зрачка,

- усложняется оптическая система за счет введения дополнительных элементов, необходимых для создания сопряженного зрачка,

- теряется доля информации об искажениях ВФ за счет дифракционных явлений в оптическом тракте, дополнительных отражений, рассеяний и поглощений полезной информации,

- усиливается влияние искажающих факторов (например, вибраций, юстировок, нестабильностей и т.д.), так как величина этих искажений становится соизмерима с размерами апертуры сопряженного зрачка,

- и, наконец, существенно возрастают ошибки коррекции ВФ за счет ошибок самого гибкого фазового корректора, помещенного в сопряженный зрачок

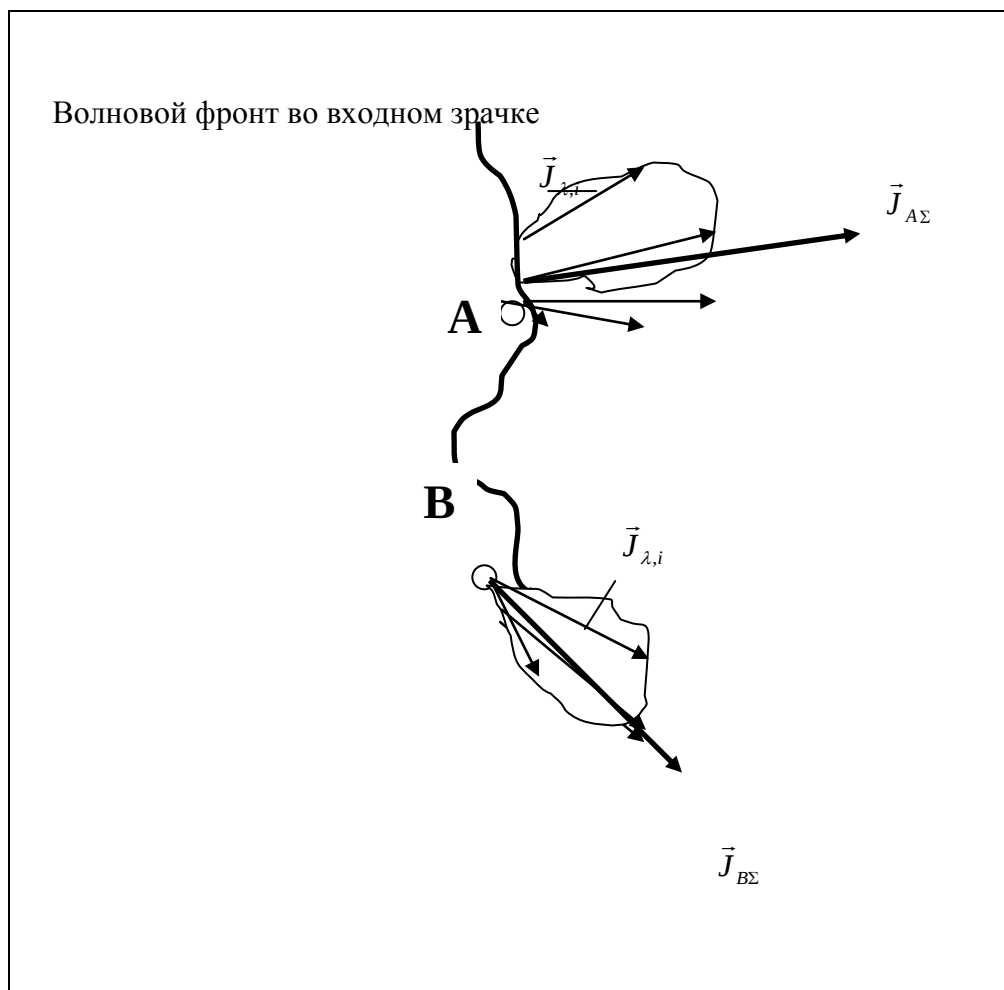


Рис. 4.4. К вопросу о понятии волнового фронта излучения

Здесь уместно задать вопрос. А что же тогда в этом случае мы понимаем под волновым фронтом излучения? Ранее под ВФ излучения понимали геометрическое место точек в сечении пучка излучения, имеющих одинаковую оптическую длину хода или имеющие одинаковую фазу излучения. Но это справедливо только для одноволнового (монокроматического) излучения, каковым, например, можно считать лазерное излучение. Оптическое же излучение от удаленного нелазерного источника (объекта) таковым не является. В этом случае от каждой точки объекта и для каждой длины волны спектра излучения мы имеем свою волну распространения излучения, которые, достигая входного зрачка накладываются друг на друга и образуют совокупность интерференционных картин, несущих информацию об искажениях проходящего излучения (рис.4.4.). По существу мы имеем дело уже с распределением по сечению пучка в плоскости апертуры вектора интенсивности излучения. Причем, в каждой точке входного зрачка результирующий вектор $\vec{J}_{\Sigma}$ образован сложением частных векторов $\vec{J}_{\lambda,i}$ в каждой точке пространства.

Данные постулаты адаптивной коррекции были сформулированы на основе многочисленных экспериментальных исследований, проведенных в период с 1983 по 1989 годы при создании методов и средств транспортировки энергии излучения мощных лазеров [9].

5. Обсуждение результатов экспериментальных исследований

В работе [9] приведены результаты комплексных стендовых исследований по формированию и передаче энергии излучения CO_2 – лазера на горизонтальной атмосферной трассе длиной в 0,5 км. Какие задачи удалось решить на данном этапе исследований? Какие реальные возможности открывает использование методов и средств адаптивной оптики в эффективном использовании энергии лазерного излучения? Какими путями достигается решение этих задач? Прежде всего, это:

- формирование системы допущений и минимизация искажений в оптическом тракте, включающем собственно резонатор лазера, Канал транспортировки мощного лазерного излучения с отклоняющими зеркалами, формирующий телескоп с составным главным зеркалом;

- формирование критериев эффективности адаптивных оптических систем;

- многоконтурность системы адаптивной коррекции искажений.

Стендовые исследования проводились поэтапно:

- минимизация искажений неадаптивными средствами

- коррекция искажений методами линейной адаптации

- коррекция искажений методами ОВФ.

-

Рассмотрим для примера формирующую оптическую систему (ФОС) положенную в основу вышеуказанного комплексного стенда и ее роль в адаптивной коррекции ВФ передаваемого лазерного излучения (рис.5.1). Использовалось составное главное зеркало (СГЗ) с эквивалентным диаметром 1,8 м и управляемыми по углу сегментными зеркалами дифракционного качества. В адаптивной оптической системе СГЗ выполняет роль фазового корректора, компенсируя локальные наклоны ВФ излучения по зонам. Зеркала имеют сферическую форму поверхности. Вторичное зеркало в составе АОС компенсирует сферическую составляющую искажений ВФ излучения. Зеркало имеет форму эллипсоида. Датчик фокусировки в контуре адаптивного управления вторичным зеркалом формирует сигнал, пропорциональный искажению ВФ в части сферической составляющей. Анализатор ВФ формирует сигналы управления, пропорциональные искажениям ВФ по локальным наклонам для каждого управляемого зеркального сегмента составного главного зеркала.

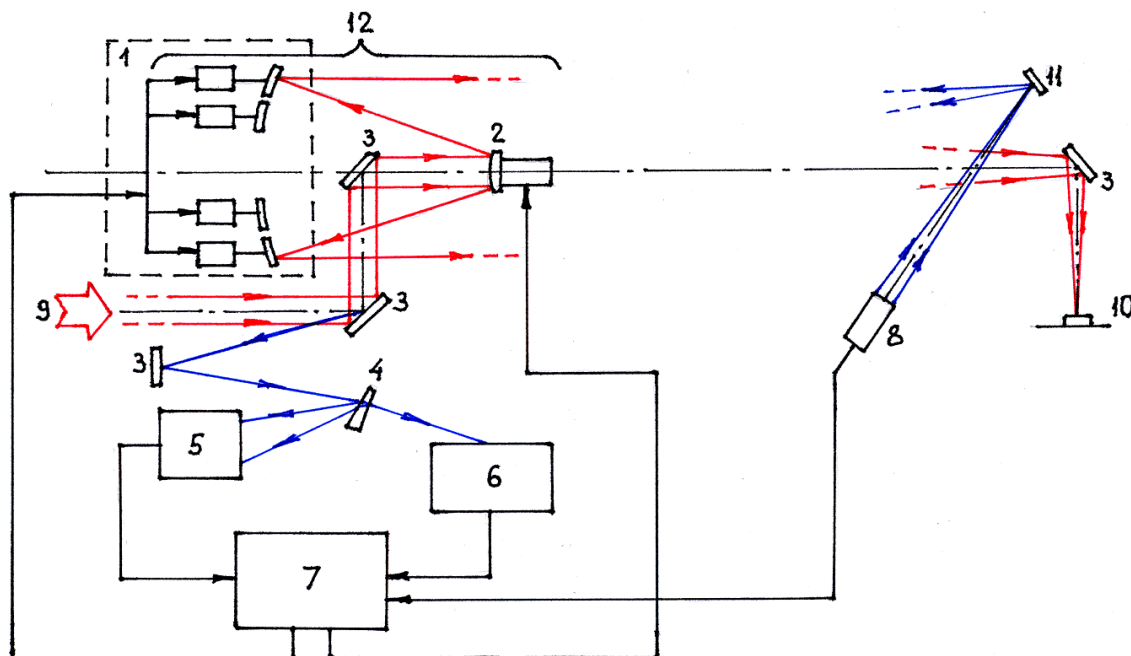


Рис. 5.1. Схема передающей оптической системы испытательного комплексного стенда.

1 – СГЗ, 2 – вторичное зеркало с приводом, 3 – плоские отклоняющие зеркала (металлические и стеклянные), 4 – разделитель излучения, 5 – датчик фокусировки, 6 – анализатор ВФ, 7 – процессор, вырабатывающий сигналы управления приводами коррекции, 8 – вспомогательный источник излучения, формирующий опорный сигнал, 9 – лазерное излучение, 10 – мишень, 11 – имитатор отраженного сигнала – "опорная звезда", 12 – формирующая оптическая система (телескоп).

Как видно из этой схемы, она содержит два контура адаптивной коррекции: один, охватывающий составное главное зеркало, другой – вторичное зеркало. В качестве опорного источника используется отраженный от объекта сигнал или его имитатор – "опорная звезда". При этом сам лазер не охвачен контуром адаптивной коррекции. Сделано это сознательно, и не потому, что в лазере нет искажений ВФ. Во-первых, в тот период (1983-1989гг.) сделать это для импульсно-периодического CO_2 -лазера было очень сложно, а во-вторых, хотелось посмотреть, как с помощью только одной формирующей системы, снабженной адаптивной системой коррекции ВФ, удастся снизить потери излучения при передаче энергии на расстояние в неблагоприятных условиях. Таким образом, необходим был выбор:

- либо использовать "плохой" лазер и хорошую формирующую оптическую систему, устраняющую или существенно снижающую искажения ВФ излучения,

- либо использовать хороший лазер, у которого с помощью собственных адаптивных средств улучшены характеристики, а уже после этого с помощью ФОС с адаптивной системой добиваться устранения остаточных искажений ВФ (см. 2-ой постулат).

Предпочтительность последнего подхода подтверждается результатами проведенных исследований на вышеуказанном стенде. Это имело принципиальное значение для выбора

концепции построения сложных оптико-электронных лазерных комплексов, таких, например, как описанные в работе [10].



Рис. 5.2. Формирующая оптическая система (ФОР) испытательного комплексного стенда (поз. 12 на рис.5.1.).

На рисунке 5.2. показан внешний вид формирующей оптической системы (ФОР) испытательного комплексного стенда. Использование предложенных постулатов при разработке или модернизации оптических средств наблюдения, как показал опыт, обеспечивают наименьший уровень остаточных искажений и эффективность работы адаптивных оптических систем.

Заключение.

Предложенные постулаты адаптивной коррекции ВФ излучения и положительный опыт их использования в полномасштабных оптических комплексах в значительной степени сократят сроки и финансовые затраты при создании эффективных средств наблюдения за удаленными объектами, а также средств формирования и доставки энергии на космические объекты для различного ее использования – энергообеспечения, связи, борьбы с космическим мусором, обеспечением астероидной безопасности и т.д.

Можно сделать вывод, что состояние отечественной оптической науки, ее потенциал в области создания адаптивных средств формирования и транспортировки мощного лазерного излучения, а также полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований, вселяют обоснованную надежду на создание в будущем высокоэффективных крупногабаритных оптико-электронных средств различного назначения.

Огромную благодарность автор выражает д.ф.-м.н. Белоусовой И.М. (ГОИ им. С.И.Вавилова) за постоянное внимание и поддержку работ в области создания крупногабаритных адаптивных оптических телескопов, а также за плодотворное творческое сотрудничество и профессиональное оппонирование при проведении комплексных испытаний.

Список литературы

1. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении: монография. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2005. 464 с.
2. Сычев В.В. Метод определения информационной емкости изображения в крупногабаритных телескопах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/413768.html> (дата обращения 01.02.2014).
3. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. The problems of the 25-m class supertelescope designing // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4004. P. 330-339. DOI: 10.1117/12.393939
4. Сычев В.В. Влияние атмосферы на качество изображения в оптических телескопах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 5. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/414002.html> (дата обращения 01.02.2014). DOI: [10.7463/0512.0414002](https://doi.org/10.7463/0512.0414002)
5. Стешенко Н.В., Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении // Итоги науки и техники. Сер. "Управление пространственной структурой оптического излучения". М.: ВИНТИ. 1990. Т. 1: Проблемы управления пространственной структурой световых пучков. С. 107-167.
6. Теребиж В.Ю. Современные оптические телескопы: монография. М.: Физматлит, 2005. 65 с.
7. Adaptive optics tutorial at CTIO. Режим доступа: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/intro.html> (дата обращения 01.02.2014).
8. Correcting the turbulence: Deformable Mirrors. Режим доступа: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/part2/dm.html> (дата обращения 01.02.2014).
9. Belousova I.M., Bulaev V.D., Grigorev V.A., Gorshkov A., Leonov S.N., Kiselev V.Y., Krugletsov V.V., Kuryapin A.I., Novoselov N.A., Sychev V.V., Smirnov V.A., Shakhonskii N.N., Khramtsov Yu.I. Complex Studies of Formation and Transportation of High-Power CO₂ Laser Radiation along a Horizontal Atmospheric Path // Proc. SPIE. 1994. Vol. 2096. P. 14-20. DOI: 10.1117/12.183121
10. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. М.: Воениздат, 1987. С. 125-145.

The main postulates of adaptive correction of distortions of the wave front in large-size optical systems

03, March 2014

DOI: 10.7463/0314.0700488

V.V. Sychev

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

viktorsychev@list.ru

In the development of optical telescopes, striving to increase the penetrating power of a telescope has been always the main trend. A real way to solve this problem is to raise the quality of the image (reduction of the image angular size under real conditions of distorting factor) and increase a diameter of the main mirror. This is counteracted by the various distorting factors or interference occurring in real-time use of telescopes, as well as by complicated manufacturing processes of large mirrors.

It is shown that the most effective method to deal with the influence of distorting factors on the image quality in the telescope is the minimization (through selecting the place to mount a telescope and choosing the rational optical scheme, creating materials and new technologies, improving a design, unloading the mirrors, mounting choice, etc.), and then the adaptive compensation of remaining distortions.

It should be noted that a domestic concept to design large-sized telescopes allows us to use, in our opinion, the most efficient ways to do this. It means to abandon the creation of "an absolutely rigid and well-ordered" design, providing the passively aligned state telescope optics under operating conditions. The design must just have such a level of residual deformations that their effect can be efficiently compensated by the adaptive system using the segmented elements of the primary mirror and the secondary mirror as a corrector.

It has been found that in the transmission optical systems to deliver laser power to a remote object, it is necessary not only to overcome the distorting effect of factors inherent in optical information systems, but, additionally, find a way to overcome a number of new difficulties. The main ones have been identified to be as follows:

- the influence of laser radiation on the structure components and the propagation medium and, as a consequence, the opposite effect of the structure components and the propagation medium on the transmitted radiation WF;
- the lack of a reference source at the wavelength of transmitted laser radiation, which is required to implement methods for adaptive correction of the distorted WF;
- the unique to laser systems additional distorting factors available in transmission systems.

These distorting factors include:

- length of the optical path due to need in spatial diversity of high power laser source with a large number of matching optical elements;
- thermal self-action of power laser radiation in the transport path of the radiation before its entry into forming optical system;
- instability of spatio-temporal characteristics of the laser radiation source itself to take a turn for the worse conditions of radiation transmission both inside the optical path, and in the free atmosphere;
- thermal irregularities and thermal deformation.

It is shown that the adaptive systems differ from the active optics in that radiation wave front distortion is corrected in real time per totality of distorting factors (not only on the effect of the atmosphere) with the speed ten times exceeding the effect of distortion itself. Here, the correction quality is estimated by criterion of the primary image quality.

In this case, the correction continuously takes into account data about optical system parameters such as current space, temperature, time, and adjusting, thereby supporting the high quality of images under the action of distorting factors.

The paper formulates and proposes the basic postulates of adaptive correction.

Postulates are a set of statements and assertions, allowing us to implement effective means of adaptive correction of distortions.

The paper also shows the real capabilities the methods and means of adaptive optics offer in case of efficient use of laser radiation power and what ways are possible to solve these tasks. First of all, these are:

- forming a system of assumptions and minimization of distortions in the optical path, which includes a laser cavity, a transport channel of powerful laser radiation with deflecting mirrors and a forming telescope with a segmented primary mirror;
- formation of the performance criteria of adaptive optical systems;
- multiplanimetric system of adaptive correction of distortions.

The paper discusses test results of the transportation of powerful laser radiation on a horizontal track and shows an external view of forming optical system of comprehensive test stand.

It is conclusively proven that using the proposed postulates when developing or modernizing the optical systems provides the lowest level of residual distortions and the operating efficiency of adaptive optical means.

The proposed postulates for adaptive correction of radiation WF and positive experience of their use in full-scale optical complexes significantly reduce time and cost in developing the effective means to observe the distant objects, as well as the means to generate and supply power to various space objects for its multiple use such as power supply, telecommunications, fighting with space debris, providing security asteroid etc.

It can be concluded that the state of the domestic optical science and its potential in the field of adaptive means to form and transport high-power laser radiation, as well as the results of theoretical and experimental studies, inspire the reasonable hope for the high-performance large-sized multipurpose optoelectronic devices to be available in the future.

Publications with keywords: [laser radiation](#), [adaptive correction](#), [the wave front of emission](#), [phase corrector](#)

Publications with words: [laser radiation](#), [adaptive correction](#), [the wave front of emission](#), [phase corrector](#)

References

1. Sychev V.V. *Adaptivnye opticheskie sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroenii* [Adaptive optical systems in large-dimensions telescope engineering]. Staryy Oskol, “Tonkie naukoemkie tekhnologii” Publ., 2005. 464 p.
2. Sychev V.V. [Method for determination picture information capacity in large-sized telescopes]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 4.
4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/413768.html> , accessed 01.02.2014.

3. Sychev V.V., Belkin N.D., Deulin E.A. The problems of the 25-m class supertelescope designing. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4004, pp. 330-339. DOI: 10.1117/12.393939
4. Sychev V.V. [Influence of the atmosphere on image quality in optical telescopes]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 5. DOI: [10.7463/0512.0414002](https://doi.org/10.7463/0512.0414002)
5. Steshenko N.V., Sychev V.V. [Adaptive optical systems in a large telescope building]. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Upravlenie prostranstvennoi strukturoi opticheskogo izluc. T. 1: Problemy upravleniya prostranstvennoy strukturoy svetovykh puchkov henia* [Results of science and technology. Ser. Management of spatial structure of optical radiation. Vol. 1: Control problems of spatial structure of light beams]. Moscow, VINITI Publ., 1990, pp. 107-167.
6. Terebizh V. Yu. *Sovremennye opticheskie teleskopy* [Modern optical telescopes]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 65 p.
7. Adaptive optics tutorial at CTIO. Available at: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/intro.html>, accessed 01.02.2014.
8. Correcting the turbulence: Deformable Mirrors. Available at: <http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/tutorial/part2/dm.html>, accessed 01.02.2014.
9. Belousova I.M., Bulaev V.D., Grigorev V.A., Gorshkov A., Leonov S.N., Kiselev V.Y., Krugletsov V.V., Kuryapin A.I., Novoselov N.A., Sychev V.V., Smirnov V.A., Shakhonskii N.N., Khramtsov Yu.I. Complex Studies of Formation and Transportation of High-Power CO₂ Laser Radiation along a Horizontal Atmospheric Path. *Proc. SPIE*, 1994, vol. 2096, pp. 14-20. DOI: 10.1117/12.183121
10. Protopopov V.V., Ustinov N.D. *Infrakrasnye lazernye lokatsionnye sistemy* [Infrared laser radar system]. Moscow, Voenizdat, 1987, pp. 125-145.