

В.П.Лукин

МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ И АДАПТИВНЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ СОВРЕМЕННЫМИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ)

Проводится последовательный анализ использования информации об атмосфере разработчиками адаптивных оптико-электронных систем на всех этапах разработки и функционирования этих систем. Анализируются работы автора и наиболее важные современные исследования.

Введение

В настоящее время считается признанным, что информация об атмосфере на уровне моделей необходима разработчикам на всех этапах проектирования, создания и функционирования адаптивных оптико-электронных систем.

Прежде всего уточним, что мы будем называть современной оптико-электронной системой (ОЭС). Если руководствоваться введенной в [13] классификацией ОЭС, то наиболее современными следует рассматривать ОЭС с фазовой обработкой информации, к которым относятся гетеродинные, голографические системы, всякого рода системы, использующие эффект Доплера, и также адаптивные оптико-электронные системы (АОЭС).

При всем различии этих двух классов ОЭС существует достаточно глубокая причинно-следственная связь между ними. И главным является использование информации о фазе (и ее флуктуациях) электромагнитной волны. Если в первом случае эта фаза является носителем информации, либо фазовые соотношения являются решающими при определении характеристик ОЭС, то во втором случае – для адаптивной оптико-электронной системы – фаза оптической волны является объектом управления, и она используется для оптимизации параметров системы и сигнала.

Структура наиболее важных этапов использования информации о моделях атмосферы при проектировании и функционировании современных ОЭС следующая:

I. Модели атмосферы на этапе выбора места расположения ОЭС.

II. Этап проектирования:

1. Выбор технических характеристик «самой» ОЭС;
2. Характеристики контура адаптивной коррекции сигналов в ОЭС;
3. Определение предельных характеристик ОЭС.

III. Этап функционирования:

1. Пассивный режим;
2. Активный режим – «лазерные опорные звезды».

IV. Этап создания проекта обновленной ОЭС.

Таким образом, модели атмосферы необходимы разработчикам оптико-электронных систем на следующих этапах: выбора места на Земле для размещения системы, выбора основных параметров самой оптико-электронной системы, определения предельных возможностей системы, разработки управляющего алгоритма, модернизации системы.

1. Основные задачи, стоящие перед современными оптико-электронными системами

1.1. Адаптивное видение через атмосферу

Безусловно, одна из главных целей развивающихся ОЭС – это увеличение каким-либо образом расстояния, на котором можно получить высококачественное изображение объекта и его точностных характеристик. Теоретические и экспериментальные исследования по адап-

тивной оптике, проектирование оптических приборов с элементами адаптивной оптики, исследование искажающих факторов атмосферы широко проводятся в таких странах, как США (разработаны самые современные телескопы с адаптивной оптикой – Кекк-1 и Кекк-2, создана система RTAC (Система коррекции атмосферы реального времени); во Франции созданы две адаптивные системы для астрономии: система «Come-On-Plus», проект ADONIS (адаптивная система для ближней инфракрасной области); Германия совместно другими членами Европейского сообщества работает над проектом «Очень большого телескопа», предусматривающим адаптивную коррекцию изображения. В теоретическую часть проекта входят оценка искажений, развитие методов их компенсации; Италия разрабатывает проекты телескопов «Галилей» и «Большой бинокулярный телескоп» с элементами адаптивной оптики; Англия и Австралия создают проект англо-австралийского адаптивного телескопа.

Проведение таких и им подобных проектов обуславливает развитие адаптивной атмосферной оптики, постановку теоретических и экспериментальных исследований. При этом особый интерес в области фундаментальных исследований проявляется к развитию алгоритмов компенсации атмосферных искажений и исследованию распространения волн оптического диапазона в атмосфере. Подобные исследования проводятся в США (в Ливерморской лаборатории, в Филлипсовской лаборатории, в Военно-морской исследовательской лаборатории, в Линкольнской лаборатории), в Германии (в Европейской южной обсерватории).

1.2. Системы фокусировки лазерного излучения

Одновременно с системами формирования изображения разрабатываются и системы доставки мощного лазерного излучения через неоднородные среды, такие как атмосфера Земли (проект США системы SELENE для передачи энергии мощного лазера наземного базирования с помощью адаптивного телескопа на геостационарный спутник). Для минимизации влияния атмосферной турбулентности и эффектов теплового самовоздействия излучения используются методы адаптивной оптики, которые реализуются посредством внедрения в оптическую систему трех принципиально новых элементов: датчика волнового фронта, измеряющего отклонения волнового фронта от требуемого компьютера, обеспечивающего преобразование данных фазовых измерений в управляющие сигналы, управляемого зеркала, преобразующего управляющие сигналы в деформацию своей поверхности, что корректирует искажения волнового фронта. Эти элементы используются, как правило, в системе с замкнутой обратной связью, в которой датчик измеряет отклонения уже исправленного волнового фронта.

Известно, что наиболее важными являются два параметра системы: число каналов и полоса частот или скорость обновления данных в системе. Именно эти технические характеристики адаптивной оптической системы и рассчитываются на основе моделей атмосферы.

Существующие в настоящее время технологии делают оптические системы, использующие элементы или системы адаптивной оптики, слишком дорогостоящими, поэтому до недавнего времени речь обычно шла о применении адаптивной оптики только для наиболее дорогостоящих оптико-электронных систем, сравнимых по стоимости с ценой самой адаптивной системы. Но сейчас в ряде стран уже заложены основы новой современной высокотехнологичной адаптивной оптики, которая, как ожидается, примерно на порядок уменьшит стоимость адаптивной системы. А это означает, что адаптивную оптику очень широко будут внедрять в новейшие военные оптико-электронные системы. И только атмосфера останется тем серьезным ограничением по применению оптических систем. Именно алгоритм работы адаптивной системы и расчет параметров самой адаптивной системы, требующие серьезных знаний об атмосфере как о рефракционной турбулентной среде с сильным поглощением излучения молекулами воздуха, станут теми самыми дорогостоящими деталями адаптивной системы. И здесь на первое место выдвигаются исследования особенностей распространения лазерного излучения в условиях реальной атмосферы как турбулентной, рассеивающей и поглощающей среды.

2. Исследование характеристик атмосферы в предполагаемом месте расположения телескопа

Рассмотрим первый этап исследуемой проблемы, а именно – использование моделей атмосферы на этапе выбора места для размещения системы формирования изображения через неоднородную среду на примере астрономического телескопа наземного базирования. Известно, что крупные астрономические телескопы, помимо оптимизации своих технических характеристик, требуют хороших условий для оптических наблюдений [1–12]. В настоящем разделе

приводятся данные, характеризующие условия наблюдения астрономических объектов для наиболее известных обсерваторий мира.

2.1. Мировой опыт по исследованию астроклимата в точках размещения телескопа

Этап выбора места для современной оптико-электронной системы, например адаптивного астрономического телескопа, это один из наиболее ответственных этапов проектирования и определения параметров будущей системы. Место для предполагаемого размещения крупного адаптивного телескопа требует значительных вложений. Как правило, этому предшествуют многолетние изыскания и атмосферные исследования, в результате которых и вырисовывается модель атмосферы для определения месторасположения ОЭС. Зачастую такая модель является более многопараметрической, нежели та, на основании которой проводятся инженерные расчеты основных параметров системы. Выбор места для будущей обсерватории должен отвечать всем требованиям, предъявляемым к таким системам с точки зрения прозрачности воздуха, количества ясных дней и ночей, малого содержания водяных паров и других поглощающих оптическое излучение неоднородностей атмосферы, низкого уровня средней турбулентности, а также требованиям к уровню рассеянного излучения, определяющему величину паразитной засветки.

Место размещения будущего телескопа должно отвечать требованиям возможности получения высококачественных изображений в отсутствии адаптивной коррекции. Правомочен следующий тезис; чем дороже телескоп (адаптивный телескоп действительно дорогая вещь), тем лучше должно быть место для его работы.

Таблица 1

Отдельные регионы США, где проводятся рутинные исследования качества видения через атмосферу

Обсерватории, где проводятся наблюдения, штат США	Годы	Виды измерений
China Lake, Калифорния	1978–1979	r_0 , на мачте C_T^2 , акустическое зондирование
Capistrano, Калифорния	1981–1983	r_0 , на мачте C_T^2 , акустическое зондирование
Mt. Wilson, Калифорния	1986–1990	r_0, Θ_0
Anderson Peak, Калифорния	1986–1990	r_0, Θ_0 , акустическое зондирование
Mt. Hamilton (Lick), Калифорния	1986–1987	r_0, Θ_0
Mt. Laquna, Калифорния	1990	r_0, Θ_0
White Sandes Missile Range, Нью-Мексико	1977+ 1983+	r_0 , на мачте C_T^2 , акустическое зондирование, Θ_0
Starfire Optical Range, Нью-Мексико	1985+	r_0, Θ_0
Haleakula, Maui, Гавайи	1985–1992	r_0, Θ_0 , шар-пилот C_T^2
Kihei, Гавайи	1988–1990	r_0, Θ_0 , шар-пилот C_T^2
Обсерватория McDonald, Техас	1985–1986	r_0, Θ_0
Rock Springs, Панама	1986	r_0, Θ_0 , шар-пилот C_T^2
Melbourne, Флорида	1986–1990	r_0, Θ_0
Anderson Mesa, Flagstaff, Аризона	1990–1992	r_0, Θ_0

Для подтверждения этого тезиса рассмотрим приведенные в работах [12] некоторые результаты примерно 20-летнего периода по рутинному исследованию качества видения через атмосферу для различных регионов США. В табл. 1 указано географическое расположение нескольких точек, в которых проводились измерения, период времени, а также перечень тех атмосферных параметров, которые измерялись. Эти географические точки представляют собой места, которые принципиально предполагались для размещения или испытаний современных ОЭС.

Из табл. 1 видно, что наиболее часто измеряемыми параметрами, характеризующими качество видения в данной географической точке, являются радиус Фрида, который приблизительно равен размеру когерентной апертуры, и угол изопланатизма атмосферы. Эти два параметра регистрируются в прямых оптических измерениях на малом телескопе. При этом фиксируются *дисперсии мерцания и дрожания изображения звезды*, приведенные в зенит.

Чаще других проводятся измерения высотного профиля (C_T^2) структурной постоянной температуры атмосферы на основе микропульсационных измерений с метеомачты и с помо-

щью азростата. Кроме этого, в ряде мест развернуты системы акустического зондирования. Все это позволяет получать вертикальные профили температуры, градиента температуры, скорости ветра (вектор), а также вертикальные профили скорости ветра и интенсивности турбулентности.

Далее приведем ряд данных, характеризующих условия наблюдения астрономических объектов [1–14] для нескольких известных обсерваторий мира.

Так, обсерватория Мауна Кия (Гавайи, США) характеризуется, по всей видимости, наилучшими условиями наблюдения. Здесь на высоте 4250 м средний размер формируемого изображения (в литературе используют обозначение FWHM) оказывается равным 0,45" в средних условиях и не хуже 0,25" в 10% наблюдений. Условия наблюдения в этой обсерватории практически сопоставимы с условиями для обсерваторий на плоскогорьях Чили: Сьерра-Параналь (2660 м над уровнем моря), Ла Силла и ряд других.

Гора Хопкинса (Аризона, высота 2200 м) является местом размещения 6,5-метрового ММТ (многозеркального телескопа) и характеризуется радиусом Фрида $r_0 = 90$ см в средних условиях наблюдения на длине волны 2,2 мкм.

Обсерватория Siding Spring в Австралии (примерно 400 км от Сиднея), расположенная на высоте 1150 м, характеризуется довольно плохим качеством изображения (FWHM $\approx 1,1-1,8$ "), что соответствует $r_0 \approx 6$ см в видимом диапазоне.

Наблюдения в обсерватории Sacramento Peak (Нью-Мексико, США) показали [1], что здесь для ночных условий наиболее существенная турбулентность наблюдается в тонком слое на высоте 1 км над поверхностью. Качество «видения» здесь характеризуется радиусом Фрида $r_0 = 3,3-17,2$ см (для $\lambda = 0,55$ мкм).

Качество изображения в районе горы Майданак (Узбекистан) в условиях, близких к свободной атмосфере, соответствует среднему видению на уровне 0,7" в 50 % наблюдений [1].

Наши измерения [2] вблизи точки стояния 6-метрового телескопа БТА (станция Зеленчукская, гора Пастухова, 2100 м) в январе-феврале 1982 г. дают значения r_0 (для $\lambda = 0,55$ мкм) в интервале 4–16 см для ночных условий наблюдения в направлении в зенит.

2.2. Программы Европейской южной обсерватории по изучению астроклимата

Интересен пример развития [6–9] в Европейской южной обсерватории (ESO, Мюнхен – Чили) специальной рабочей группы по оценке и выбору места для размещения «очень большого телескопа» (Very Large Telescope – VLT). Когда было принято решение по строительству VLT, то одной из первых была поставлена задача определения места размещения этого уникального астрономического прибора. Группа для исследования астроклимата нескольких районов, прилегающих к обсерватории Ла Силла (La Silla, Чили), была образована в 1984 г. В 1986 г. был выполнен эксперимент Lassca'86 в районе обсерватории Ла Силла (Европейская южная обсерватория, La Silla, Чили). Использовался большой набор измерительных приборов, позволяющий измерить функцию размытия точки изображения звезды (ФРТ):

- метеорологическая станция на мачте;
- система акустического зондирования SODAR;
- система радиолокационного зондирования до высот более 20 км;
- 2,2-метровый телескоп, работающий в режиме спекл-интерферометра;
- 1,52-метровый телескоп, оснащенный специальным измерителем дрожания изображения звезды – SCIDAR;
- 0,52-метровый телескоп, оснащенный интерферометром сдвига.

Результаты измерения метеорологических и оптических характеристик в эксперименте Lassca'86 сводятся к измерению или оценке на основе модели атмосферы следующих данных:

$C_n^2 = (h)$ – вертикального профиля структурного показателя температуры;

$C_n^2(h) = (80 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T^2})^2 C_n^2(h)$ – структурного параметра показателя преломления;

$r_0 = (0,423 k^2 (\cos \gamma)^{-1} \int C_n^2(h) dh)^{-3/5}$, [м] – радиуса когерентности Фрида ($k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны; γ – зенитный угол);

$$\text{FWHM} = 2,045 \cdot 10^7 \left[(\cos \gamma)^{-1} \int_{H_0}^{H_1} dh C_n^2(h) \right]^{-3/5} - \text{основной характеристики качества изображения, представляющей собой полуширину среднего изображения звезды (для } \lambda = 0,5 \text{ мкм) в фокусе телескопа (измеряется в угловых секундах).}$$

Было обнаружено, что в обсерватории Ла Силла (La Silla, Чили) среднее видение в фокусе телескопа составляет 1,07", минимальное значение FWHM $\approx 0,48''$. При этом оказалось возможным оценить парциальные вклады разных участков оптической трассы, на которой формируется изображение. Вклады разных участков соответственно составили (%):

влияние купола телескопа	–	5 \pm 3,0
влияние атмосферы в слое	10–30 м	4 \pm 0,2
то же	300–800 м	77 \pm 5,0
то же	≥ 1000 м	14 \pm 1,0

2.3. Возможности оценки некоторых характеристик адаптивного телескопа

Данные оптических и метеорологических измерений позволяют оценивать [6–8] технические характеристики адаптивного телескопа (АТ).

К таким характеристикам относятся: оптимальное время экспозиции для адаптивного телескопа, изопланатический угол, внешний масштаб турбулентности. Рассмотрим их последовательно в соответствии с работой [9].

Оптимальное время экспозиции для адаптивного телескопа АТ определяется через время характерного изменения фазового распределения τ_{a0} , которое связано с вертикальным профилем турбулентности и эффективной горизонтальной скоростью ветра v^* :

$$\tau_{a0} = 0,31 \frac{\tau_0}{v^*}, \quad v^* = \left(\int_0^\infty |v(h)|^{5/3} C_n^2(h) dh / \left(\int_0^\infty C_n^2(h) dh \right) \right).$$

Изопланарный (или изопланатический) угол для адаптивного телескопа определяет угловой сектор, в котором возмущения волнового фронта в одной и той же точке входного зрачка, пришедшие по двум различным направлениям, могут эффективно коррелировать. Численно он выражается как

$$\theta_a = 0,31 \frac{r_0}{h_{a0}},$$

где

$$h_{a0} = \left(\int_0^\infty h^{5/3} C_n^2(h) dh / \left[\int_0^\infty dh C_n^2(h) \right] \right)$$

– эффективная толщина атмосферы.

Внешний масштаб турбулентности L_0 – это особо важный параметр для адаптивного телескопа, который оценивается исходя из формул:

$$C_n^2 = 2,8 M^2(h) L_0^{4/3}(h);$$

$$M(h) = -78 \cdot 10^{-6} \frac{\rho(h)}{T(h)} \frac{\delta \ln T_p(h)}{\delta h};$$

$$T_p = T(1000/\rho)^{0,286}.$$

Последние выражения позволяют получить оценку величины внешнего масштаба L_0 , исходя из данных текущих измерений вертикальных профилей $C_n^2(h)$, температуры $T(h)$ и давления $\rho(h)$.

Внешний масштаб турбулентности представляет собой ключевой параметр [4, 5, 14, 17, 18, 23, 49, 50] для оценки относительной энергии (величины дисперсии) первой моды

для флуктуации фазы, а также масштабов корреляции второй и третьей модовых составляющих – вектора случайного наклона волнового фронта [14]. Это особенно важно для телескопов-интерферометров, а также для телескопов с большими апертурами [41, 42]. В связи с этим разработчикам аппаратуры для оснащения современных обсерваторий необходимо учесть введение дополнительного оптического измерителя для текущей регистрации этого параметра атмосферы.

2.4. Предложения по развитию измерительных инструментов

Современная астрономическая обсерватория, оснащенная телескопами и интерферометрами «новых технологий», формулирует повышенные требования к качеству информации о состоянии атмосферы, а также к параметрам используемых моделей атмосферы. Это не только такие общепринятые характеристики качества атмосферы для обсерватории, как «видение», «прозрачность», «число ясных часов в году», это еще и ряд количественных параметров, а также ряд функциональных характеристик.

Так, М.Сарацин (руководитель группы по выбору места для телескопа-интерферометра VLT [6–8]) рекомендует использовать следующие значимые параметры для характеристики условий наблюдений в астрономической обсерватории:

- L_0 – внешний масштаб турбулентности;
- r_0 – радиус Фрида;
- θ_{a0} – изопланарный угол;
- θ_{SI} – изопланарный угол для спекл-интерферометрии;
- τ_{a0} – время когерентности для адаптивной оптики;
- τ_{SI} – время когерентности для спекл-интерферометрии;
- v_{\max} – максимальная скорость ветра (в тропосфере);
- v_0 – усредненная скорость ветра;
- H_2O – количество накопленных паров воды.

Если обсерватория оснащается адаптивным телескопом, то вышеперечисленные параметры необходимы как на этапе выбора технических характеристик телескопа (как характеристики точки стояния телескопа), так и на этапе функционирования телескопа (для определения алгоритма управления).

Помимо этого развитие алгоритмов постдетекторной обработки изображений требует знания (измерения или расчет) короткоэкспозиционной оптической передаточной функции системы «атмосфера–телескоп» [10].

В свете всего сказанного можно рекомендовать в качестве базового следующий набор измерителей [13]. Прежде всего остановимся на *дистанционных измерителях атмосферы*. Эти технические средства должны обеспечивать:

1. Балонные измерения с помощью микропульсационных температурных датчиков средней температуры, градиента температуры, скорости ветра.
2. Акустическое зондирование в интервале высот от 30 до 600–800 м. (Синхронные измерения температуры и скорости ветра на мачте улучшают калибровку данных акустического зондирования для высот менее 30).
3. Измерение мерцания и дрожания изображения звезды на основе специализированных фотоприставок на малом телескопе [2].
4. Двухлучевой звездный интерферометр (с переменными базами в пределах 12–30 м).

Помимо этого необходим телескоп (диаметр < 1 м), работающий в режиме спекл-интерферометра, а также базовый (на мачте высотой 30–40 м) метеорологический комплекс для измерения средних и пульсационных значений метеопараметров.

В Институте оптики атмосферы СО РАН разработан набор таких измерителей, а также целые измерительные комплексы [2, 13, 14], обеспечивающие анализ астроклимата различных регионов бывшего СССР. Необходимо при создании национальной астрономической обсерватории, по возможности, максимально использовать этот опыт.

На рис. 1, 2 приведены комплексы аппаратуры, разработанные в Институте оптики атмосферы СО РАН, обеспечивающие получение практически всех необходимых оптических и метеорологических характеристик, формирующих структуру «астроклимата» для местоположения астрономического телескопа.

Опишем основные тактико-технические данные измерителей, представленных на рис. 1. Состав аппаратуры: метеорологическая мачта высотой 36 м, оборудованная стандартными из-

мерителями температуры, скорости ветра, давления. Портативный ультразвуковой термоанемометр [14], обеспечивающий измерение температуры, двух компонент средней скорости ветра и ее пульсаций, а также структурной постоянной температуры.

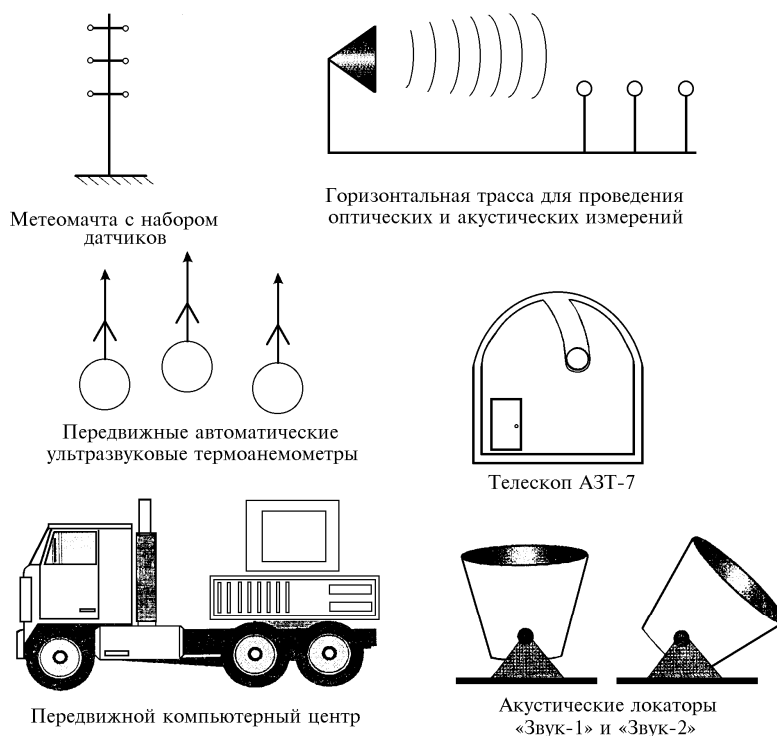


Рис. 1. Измерительные средства научной станции Института оптики атмосферы СО РАН

Акустические системы зондирования атмосферы (системы «Звук-1», «Звук-2»), представляющие собой передвижной буксируемый комплекс, состоящий из одной или трех акустических антенн и аппаратной кабины. Эти системы обеспечивают измерения вертикальных профилей скорости ветра, температуры и характеристик турбулентности в диапазоне высот от 40 до 1000 м.

Комплекс аппаратуры для измерения спектральной прозрачности атмосферы, мерцаний и дрожания звезды, созданный на базе фотоэлектрических приставок, на малом астрономическом телескопе АЗТ-7 [2,14]. Параметры телескопа и его фотоприставок на основе фотодиссекторов гарантируют определение углового положения центра тяжести изображения звезды с точностью примерно $0,08''$ и измерение его отклонения в полосе частот $0,01-100$ Гц.

Все приведенные на рис.1 измерители разработаны в ИОА СО РАН, прошли метрологическую экспертизу и доказали свою работоспособность, обеспечивая сопровождение экспериментов по исследованию особенностей распространения оптического излучения в атмосфере.

Аппаратурный комплекс на рис. 2 (рис. 2 и материалы к нему любезно предоставлены автору сотрудником ИОА СО РАН к.ф.-м.н. В.П. Галилейским) является относительно новым, однако и он уже проверен в ряде экспедиционных работ. В его составе входят:

- фотометр «всего неба», который работает как в дневное, так и в ночное время и определяет прозрачность атмосферы, в том числе наличие облачности (балл облачности);
- солнечный телескоп, объединенный со спектральным фотометром, обеспечивает определение эффективной толщи атмосферы при разных углах Солнца;
- солнечно-звездный многоволновой фотометр, выполненный на базе малого телескопа АЗТ-7, который измеряет спектральную прозрачность атмосферы при различных зенитных углах в фиксированных спектральных интервалах длин волн.

Эти измерители могут дублироваться многоволновым солнечным фотометром и инфракрасным спектральным радиометром.

Аппаратура создана на базе отечественных комплектующих и имеет прямой доступ данных в персональный компьютер для накопления, статистической обработки и построения моделей оптических характеристик атмосферы.

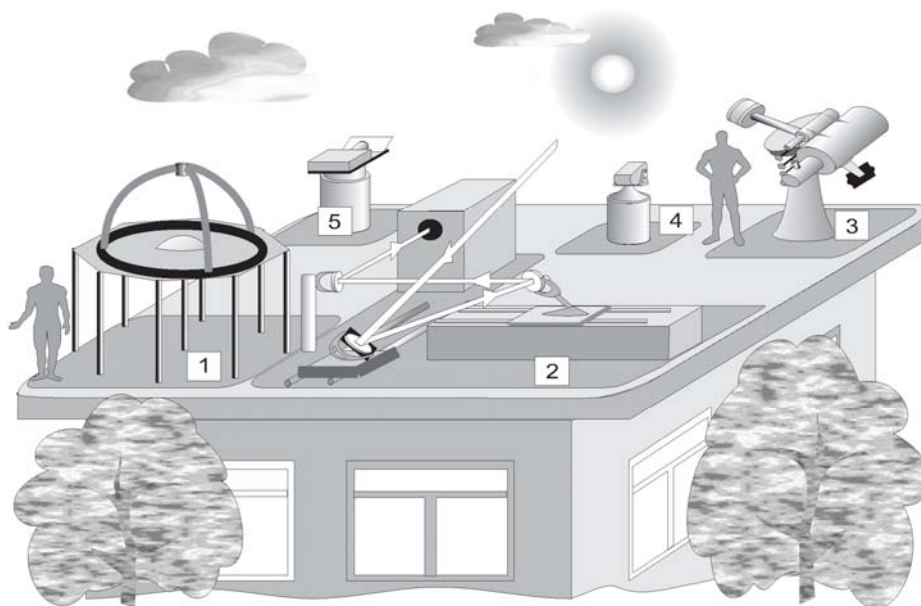


Рис. 2. Структура размещения измерителей на астроплощадке ИОА СО РАН: 1 – фотометр всего неба; 2 – солнечный телескоп со спектрофотометром; 3 – многоволновой звездно-солнечный фотометр; 4 – многоволновой солнечный фотометр; 5 – инфракрасный спектрорадиометр

2.5. Эффективный внешний масштаб турбулентности

Один из традиционных способов оценки параметров изображения будущего телескопа состоит в измерении параметров изображения, получаемого в телескопе малого диаметра. Однако турбулентная ФРТ (функция размытия точки) малого телескопа будет соответствовать ФРТ телескопа большого диаметра, если в обоих случаях внешний масштаб турбулентности будет существенно превышать диаметр большого телескопа. В некоторых работах, выполненных в последнее время, показано, что для современных телескопов, размеры апертур которых превышают 10 м, это условие нарушается.

Говоря о внешнем масштабе, следует иметь в виду, что в реальной атмосфере он меняется с увеличением высоты точки наблюдения над подстилающей поверхностью. В связи с этим становится актуальной задача расчета параметров изображения для телескопа по измеренным высотным профилям внешнего масштаба и интенсивности турбулентности. Однако применение высотных профилей не всегда удобно из-за их зависимости от географического положения.

Большой интерес с точки зрения практического применения представляет возможность введения *эффективного* внешнего масштаба турбулентности, имеющего смысл некоторой интегральной характеристики, описывающей характер атмосферной турбулентности в целом [49,50].

Основной задачей выполненных нами работ [17–19, 23, 24, 49, 50] была оценка погрешности расчета некоторых интегральных характеристик формируемой оптической системой изображения, связанной с заменой высотного профиля внешнего масштаба на постоянное значение – *эффективный* внешний масштаб турбулентности.

Расчеты проводились для ряда высотных профилей интенсивности турбулентности и внешнего масштаба, известных из литературы. Для определения *эффективного* внешнего масштаба турбулентности использовалась минимизация интегральной квадратичной невязки между реальной структурной функцией фазы (рассчитанной на основе реальных профилей интенсивности турбулентности и внешнего масштаба турбулентности) и эффективной структурной функцией фазы, рассчитываемой на основе эффективного внешнего масштаба и радиуса Фрида. Очевидно, что величина невязки зависит от верхней границы интервала интегрирования, на котором она определяется. Были использованы [49, 50] три различных интервала:

1. 10 м, что соответствует диаметру наибольшего из известных телескопов;
2. $\text{Arg}(90\%)$, что соответствует значению аргумента, при котором структурная функция фазы достигает 90% от уровня насыщения;
3. «Бесконечность», что соответствует определению по уровню насыщения структурной функции фазы.

Таблица 2

Эффективный внешний масштаб турбулентности для «наилучшей» модели высотного профиля турбулентности. Модели высотного хода внешнего масштаба турбулентности (B, C, D, E) представлены в [18, 19]

Модель $L_0(h)$	Метод		
	10 м	Arg (90%)	∞
B	34,7	50,6	58,4
C	32,5	39,9	42,9
D	0,60	0,66	0,71
E	0,68	0,75	0,84

Таблица 3

Эффективный внешний масштаб турбулентности для «наихудшей» модели высотного профиля турбулентности. Модели высотного хода внешнего масштаба турбулентности (B, C, D, E) представлены в [18, 19]

Модель $L_0(h)$	Метод		
	10 м	Arg (90%)	∞
B	55,4	88,5	98,0
C	40,6	49,3	52,3
D	1,04	1,13	1,78
E	1,31	1,46	7,56

Из табл. 2 и 3 видно, что на величину эффективного внешнего масштаба турбулентности в значительном мере влияет как высотный профиль интенсивности турбулентности, так и метод определения.

Введение эффективного внешнего масштаба турбулентности может существенно упростить математические расчеты, связанные с учетом влияния атмосферной турбулентности на фазовые характеристики оптической волны при распространении на вертикальных и наклонных атмосферных трассах.

3. Значение современных исследований по распространению лазерного излучения в атмосфере

Следующий этап создания современной системы – это этап выбора основных параметров самой оптико-электронной системы. В настоящее время такие исследования ведутся практически всем мировым оптическим сообществом. Требования сегодняшнего дня делают эту задачу достаточно комплексной.

3.1. Современные проблемы проектирования ОЭС

Технологии применения современных оптико-электронных систем в условиях реальной атмосферы требуют все более совершенного знания о характеристиках основной среды, в которой будет осуществляться распространение лазерного излучения, – атмосферы. Проектирование современных оптико-электронных систем (пока очень дорогостоящих) требует значительных затрат на то, чтобы эти оптико-электронные системы работали в условиях, обеспечивающих их наиболее высокие характеристики.

Проблемам адаптивной оптики в 1992–1996 гг. было посвящено несколько конференций (1992 г. – Гавайские острова, США; 1993 г. – Мюнхен, ФРГ; 1994 г. – Гавайские острова и Орландо, США; 1995 г. – Мюнхен, ФРГ; 1996 г. – Гавайские острова, США); Летняя школа НАТО (1993 г., остров Корсика, Франция), Зимняя школа НАТО (1996 г., Франция). Наши работы также были представлены на этих конференциях и школах [20–22, 24, 25, 27–31, 33–36, 45–47].

При построении теории функционирования атмосферных адаптивных оптических систем мы считаем необходимым учитывать основные флуктуационные компоненты атмосферы: атмосферную рефракцию, атмосферную турбулентность, тепловое самовоздействие излучения, обусловленное молекулярным поглощением.

Возможности фокусировки мощного лазерного излучения с использованием адаптивных алгоритмов исследовались нами в численном эксперименте для различных сценариев распространения излучения. Прежде всего для однородных оптических трасс была исследована сравнительная эффективность адаптивной фокусировки на основе различных алгоритмов управления. Были проанализированы, в порядке усложнения, алгоритмы «априорной фазовой» коррекции, «медленной» и «быстрой» адаптивной фазовой коррекции на основе опорного излучения, а также алгоритмы амплитудно-фазовой коррекции искажений мощных лазерных пучков [14–16, 26].

Кратко суммируем полученные результаты. Эффективность «априорной фазовой» коррекции оказывается пропорциональна числу Френеля излучающей апертуры. Для ближнего инфракрасного диапазона (<3 мкм) турбулентность атмосферы заметно уменьшала интенсивность лазерного пучка в фокусе, «априорная» коррекция увеличивала интенсивность в фокусе примерно вдвое. Адаптивная оптическая система на горизонтальной трассе стремится сфокусировать мощный пучок в «точку» («быстрое фазовое сопряжение») и в «линию» («медленное фазовое сопряжение») вблизи излучающей апертуры, причем степень дефокусировки ограничивается дифракцией мощного пучка и дислокациями в опорном пучке.

Анализируя различные сценарии распространения, в частности наклонные атмосферные трассы, однородные «высотные» трассы, сканирование мощных лазерных пучков, мы убедились, что наиболее важным эффектом, сопровождающим процесс фокусировки мощного излучения, является проявление «нестабильности». Причем принципиально важна как нестабильность самого процесса теплового самовоздействия, так и ее проявление в условиях адаптивного управления [26, 33]. Мы исследовали различные режимы работы адаптивных систем на атмосферных трассах различного типа. Основным здесь является то, что проявление нестабильности переводит процесс адаптивной фокусировки мощного лазерного излучения в итерационный процесс, в котором чередуются «хорошие» и «плохие» итерации.

3.2. Создание 4-мерного компьютерного кода для динамического моделирования адаптивных систем

В настоящее время мы создали основу для реализации 4-мерной динамической модели [30, 37–40] адаптивной оптической системы, функционирующей в атмосфере. В частности, мы создали численные модели отдельных составляющих адаптивного контура, а именно:

- а) модель распространения мощных лазерных пучков через рефракционную и турбулентную среды;
- б) модель низкочастотного участка спектра атмосферной турбулентности (для случая приземного слоя атмосферы и для всей толщи атмосферы в целом) [21, 23, 25, 28, 31];
- в) модели датчиков волнового фронта;
- г) различные модели многоэлементных составных и деформируемых активных зеркал;
- д) модель квантовых флуктуаций потока излучения.

Используя эту компьютерную динамическую модель, мы исследовали предельные возможности наземных адаптивных телескопов как функции числа измерений в датчике волнового фронта, интенсивности и структуры турбулентности и величины самого принимаемого оптического сигнала.

Применительно к задачам адаптивной фокусировки мощного лазерного излучения такая динамическая модель позволяет исследовать временные режимы действия АОС, выявить физические закономерности формирования нестабильностей при тепловом самовоздействии излучения, понять причины и источники этих нестабильностей. Развитие таких компьютерных моделей позволяет подойти к проектированию АОС с точки зрения выбора оптимальных конфигураций датчика волнового фронта и управляемого деформируемого зеркала, учесть в расчетах такие эффекты, как проявление неизопланарности в больших оптических системах, моделировать искусственные опорные источники, а также анализировать эффективность различных алгоритмов управления как динамическим активным зеркалом, так и системой в целом.

Созданная в Институте оптики атмосферы СО РАН численная динамическая модель атмосферной адаптивной оптической системы является уникальным инструментом для анализа оптико-электронных систем в атмосфере. Данная модель прошла проверку в различных институтах России, США (Линкольнская лаборатория, Ливерморская лаборатория), Китая (Нанкинский центр астрономических инструментов, Пекинский институт прикладной физики и вычислительной математики). Результаты расчетов мы сравнивали с расчетами на основе модели Молли, разработанной в США.

3.3. Современные задачи проектирования адаптивных оптико-электронных систем

Следующий этап использования ОЭС, требующий углубленного знания об атмосфере или ее моделях, связан с проектированием и созданием уже непосредственно адаптивной оптической системы. В целом мы предлагаем полностью замкнутый анализ адаптивных систем с расчетом отдельных ее компонентов. В развитие выполненных работ мы предполагаем, в частности:

1. Проведение аналитических и численных расчетов статистических характеристик флуктуаций фазы оптических волн, распространяющихся в случайно-неоднородной среде при произвольных значениях характерных параметров: дисперсии флуктуаций интенсивности, соотношений размера неоднородностей или приемной апертуры и масштаба когерентности излучения.

2. Сопоставление результатов аналитических расчетов и численного решения параболического волнового уравнения в областях как «слабых», так и «сильных» флуктуаций интенсивности.

3. Развитие эффективных алгоритмов восстановления фазы оптической волны по данным оптических измерений. И на этой основе разработать методы измерения фазы оптической волны в условиях возникновения спекл-структуры в измеренном поле. Экспериментальное устройство должно обеспечить измерения фазовых флуктуаций при проявлении «нулевых» значений интенсивности измеренного поля. Уже в 80–90-х годах сотрудники Института оптики атмосферы СО РАН в своих работах развивали математический аппарат, позволяющий более строго определить само понятие фазы оптической волны в тех случаях, когда интенсивность поля испытывает значительные флуктуации. Было разработано несколько вариантов измерителей фазы оптической волны, развиты методы восстановления волнового фронта из данных оптических измерений в условиях «сильных» флуктуаций интенсивности, т.е. когда в распределении поля появляются отдельные или множественные яркие и темные области – «спеклы». Очевидно, здесь требуется разработка нового математического аппарата, который позволит описать так называемые дислокации фазы в оптической волне.

4. Описание флуктуаций фазы оптической волны на основе модели атмосферы, выполненной по данным экспериментальных измерений. Разработку модели спектральной плотности флуктуаций показателя преломления турбулентной атмосферы (для различных условий распространения) в области крупномасштабных оптических неоднородностей. Изучение изменчивости внешнего масштаба и всего спектра турбулентности в зависимости от термодинамической неустойчивости атмосферы [21, 23, 25, 28, 47].

3.4. Моделирование адаптивной системы, обеспечивающей минимизацию искажающего влияния атмосферы на характеристики излучения

Сейчас практически всеми исследователями уже принято, что при создании современных оптико-электронных систем альтернативы использованию адаптивной коррекции нет. В этой связи следует признать целесообразным, что одновременно с разработкой и проектированием самой оптико-электронной системы проводится анализ возможностей применения адаптивных методов коррекции атмосферных искажений.

Современные оптико-электронные системы как для передачи энергии, так для передачи информации, т.е., изображения в атмосфере безусловно должны проектироваться на основе, по возможности, полных знаний о характеристиках оптических волн и о закономерностях их атмосферных флуктуаций. Использование мирового опыта позволяет говорить о том, что применение адаптивной коррекции сулит огромные перспективы увеличения эффективности работы оптических систем.

В настоящее время бесспорным лидером по развитию адаптивных оптико-электронных систем является США. Следует отметить, что на ряде международных конференций в течение 1993–1996 гг. специалисты США заявляли, что наибольшего успеха им удалось достичь в использовании адаптивной оптики для астрономии (наземные и космические телескопы), в то же время адаптивная оптика для транспортировки мощного излучения дает, по их оценкам, пока не слишком хорошие результаты. В этом направлении исследований наибольшего успеха достигли специалисты двух крупнейших национальных лабораторий США (Линкольнская и Ливерморская национальные лаборатории). В США, Франции и Германии программы по адаптивной оптике для астрономии уже сейчас дают реальную отдачу.

В целом можно заключить, что в настоящее время в США очень серьезно развернуты работы по применению адаптивной оптики (Линкольнская лаборатория, Ливерморская лаборатория, университеты штатов Аризона, Гавайи, специальная ассоциация «Адаптивная оптика»). В самое ближайшее время в США вводятся в эксплуатацию два телескопа: Кекк-1 и Кекк-2 с размером главного зеркала 10 м, состоящего из 36 активных элементов, которые установлены на Гавайях в обсерватории Мауна Кия. В Калифорнии изготавливается адаптивный солнечный телескоп, развернута специальная программа по проектированию целого семейства телескопов с диаметром 8 м (проект «Близнецы»). США в рамках конверсии бывших работ по Стратегической оборонной инициативе ведут работы по использованию мощных лазеров для формиро-

вания искусственных опорных звезд, а также по использованию лазеров для передачи энергии на геостационарные спутники и станции – проект «SELENE».

ФРГ и Франция ведут работы по созданию «Очень большого телескопа» – это телескоп-интерферометр, состоящий из четырех 8-метровых телескопов, который будет располагаться в Чили. Италия ведет работы по созданию адаптивного телескопа «Галилей». Создают адаптивные телескопы в Китае (2 м, 4 м), в Англии, в Канаде, в Австралии (проект – 14 м), в Швеции, в Мексике (проект – 6 м), Японии – (проект телескопа «Субару» – 8 м).

Разработчики адаптивных оптических систем в Институте оптики атмосферы СО РАН ставят перед собой задачу развития теории современных адаптивных оптических систем передачи энергии и изображения в атмосфере применительно к их использованию в наиболее современных оптико-электронных системах. В частности, предполагается развитие теоретических основ, а также создание отдельных образцов новых оптико-электронных приборов. Решение этих задач представляется особенно актуальным в связи с внедрением адаптивной оптики и ее элементов в современные специальные ОЭС.

В рамках этих задач сотрудники Института оптики атмосферы СО РАН разрабатывают:

- а) 4-мерное программное обеспечение для моделирования функционирования адаптивных систем в атмосфере,
- б) дизайн-проект общей конструкции адаптивного телескопа и других оптических систем,
- в) модели атмосферы для наиболее перспективных точек размещения крупногабаритных телескопов России и других оптико-электронных систем,
- г) макеты отдельных элементов адаптивной системы с проведением испытаний этих элементов в атмосфере.

Таблица 4

	МК			ММК		
	$\lambda = 0,5$ мкм	$\lambda = 1,6$	$\lambda = 2,2$	$\lambda = 0,5$ мкм	$\lambda = 1,6$	$\lambda = 2,2$
r_0 , м	0,18	0,72	1,06	0,15	0,61	0,89
θ_0 , угл.с	3,0	12,0	17,7	1,3	5,2	7,7
t_0 , мс	3,6	14,4	21,2	1,8	7,2	10,6

В табл. 4 приведены рассчитанные значения основных параметров, определяющих характеристики адаптивного телескопа: радиус когерентности Фрида, угол изопланатизма атмосферы, время «жизни» фазового распределения для трех различных длин волн излучения (0,5; 1,6 и 2,2 мкм) и для двух различных моделей МК и ММК атмосферной турбулентности [11, 12].

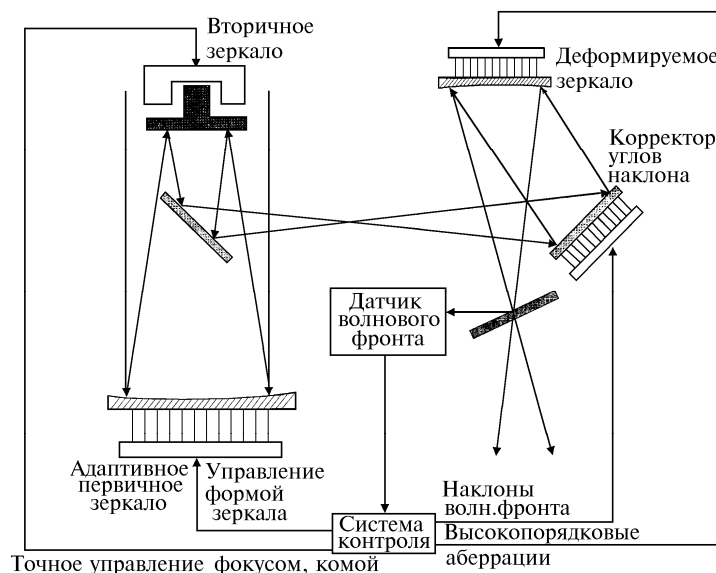


Рис. 3. Структурная схема адаптивного телескопа с активным первичным зеркалом и двумя адаптивными зеркалами

Выполнялся дизайн-проект адаптивного телескопа с составным главным зеркалом. На рис. 3 приведена структурная схема адаптивного телескопа с активным зеркалом и двумя адаптивными зеркалами. Результаты расчетов для проекта российского телескопа АСТ-10 с составным главным зеркалом [46] приведены на рис. 4 в виде четырех фрагментов: три из них соответствуют расчетам ФРТ для различных режимов турбулентности, четвертый показывает поведение отношения Штреля для такого адаптивного телескопа.

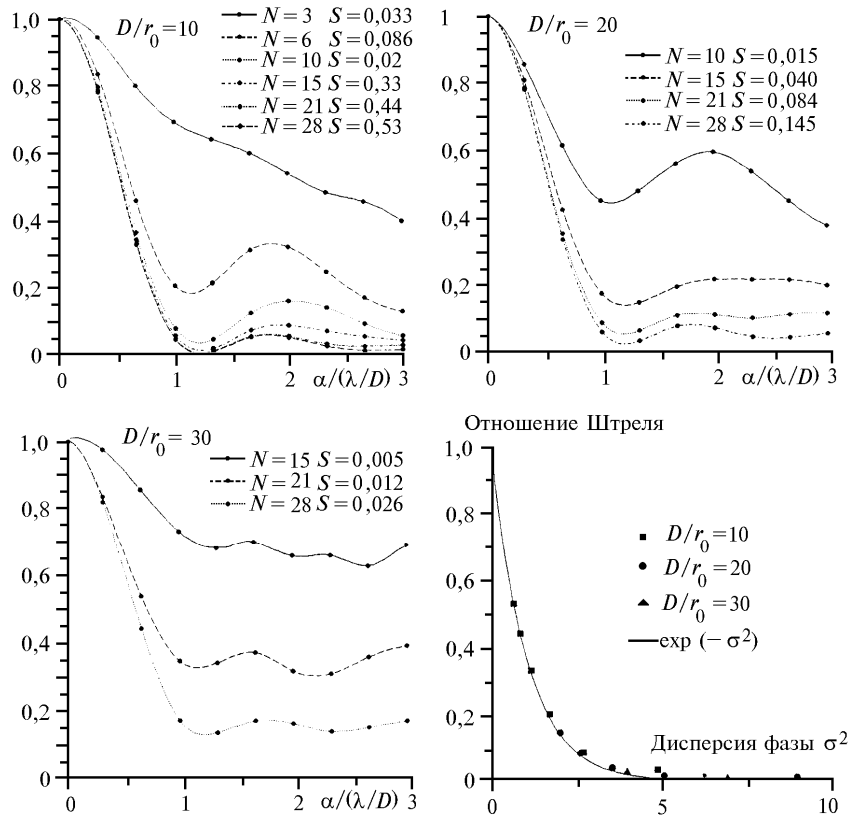


Рис. 4. ФРТ для телескопа АСТ-10 при использовании модального корректора. Параметр N соответствует числу полиномов Цернике. ФРТ нормирована на осевое значение. S –параметр Штреля

4. Этап функционирования адаптивной оптической системы

На этом этапе для адаптивной оптико-электронной системы выделяют несколько существенно различных режимов работы, заключающихся в различном уровне использования информации об атмосфере.

4.1. Пассивный режим работы ОЭС

Следует выделить специально вопрос об использовании в цепи обратной связи данных оптических измерений по реальной опорной звезде. В этом случае модель атмосферы привлекается на уровне определения допустимого угла отстройки рабочего направления оси оптико-электронной системы и направления на опорную звезду, так называемого угла изопланатизма атмосферы (см. табл. 4). Модель атмосферы здесь используется для расчета предельного угла изопланатизма в данном направлении при работе через всю атмосферу.

Значительный интерес приобретают различные алгоритмы, использующие априорную информацию об искажающих свойствах атмосферы в период работы ОЭС. Это алгоритмы, основанные на статистическом предсказании флуктуаций фазы. В одной из первых подобных статей [15] описывался алгоритм статистического предсказания, гарантирующий устойчивую работу при любой временной задержке в адаптивной системе. Известна модификация этого алгоритма, реализующая так называемое модовое предсказание флуктуаций [14].

В последнее время развиваются ряд подходов, применяющих знания оптической передаточной функции атмосферы при коротких экспозициях для постдетекторной коррекции полу-

чаемых в телескопе изображений. Причем здесь различают алгоритмы постдетекторной обработки, которые используют оптическую передаточную функцию, рассчитываемую на основе модели турбулентной атмосферы («слепая обратная свертка»), и алгоритмы, использующие данные прямых измерений этой характеристики. Следует различать несколько альтернативных подходов: оптическая передаточная функция измеряется непосредственно в процессе эксперимента, либо используются данные с датчика волнового фронта для расчета этой функции. Вместе с тем при создании реальной ОЭС приходится сталкиваться с проблемой невозможности получения качественной фазовой информации при использовании реальных опорных источников. Это уменьшает возможности ОЭС.

4.2. Проблемы использования лазерных опорных звезд

Одна из серьезных инженерных проблем, с которой сталкиваются разработчики адаптивных оптических телескопов, – это необходимость использования достаточно ярких звезд в качестве опорных источников, поскольку зачастую датчик волнового фронта такого телескопа требует большую часть энергии излучения звезды для обеспечения своего нормального функционирования. Требование к энергетике опорного источника, а также необходимость одновременного нахождения в одной изопланарной области исследуемой звезды (или любого другого космического объекта) и достаточно яркой опорной звезды, ввиду малости угла изопланатизма атмосферы (в видимой области длин волн при распространении в зенит это составляет 10–15"), существенно уменьшает процент охвата неба таким телескопом.

Разработчики адаптивной оптики нашли путь решения этой проблемы в использовании фокусированного лазерного излучения, направляемого с Земли и рассеиваемого назад неоднородностями атмосферы. Это может быть упругое аэрозольное рассеяние с высот 8–20 км или стимулированное переизлучение с высот 80–100 км на облаках атомарного натрия.

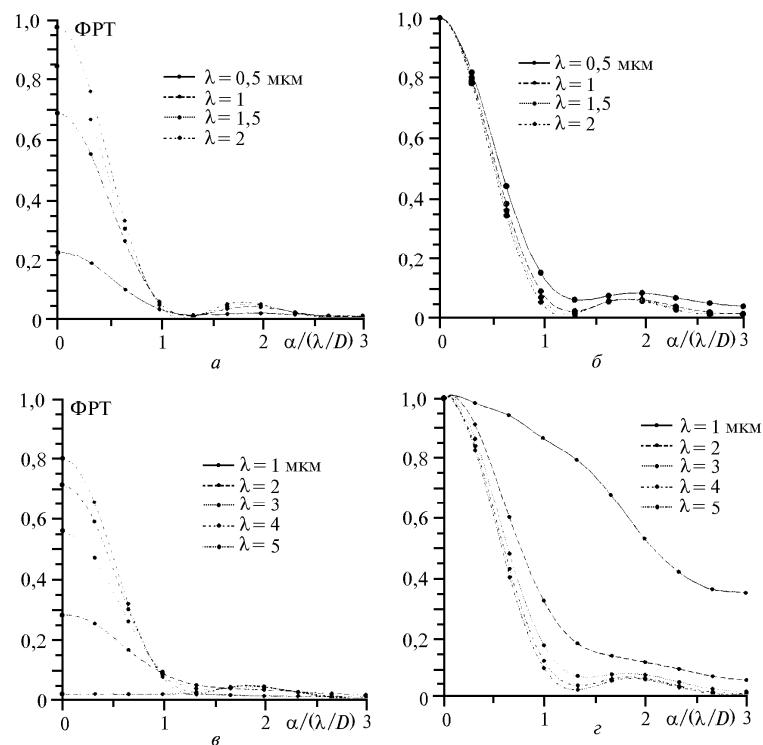


Рис. 5. ФРТ АСТ-10 для различных длин волн при адаптации по лазерной опорной звезде: а, б – для натриевой (ЛОЗ $H = 100$ км), в, з – для рэлеевской ($H = 10$ км); а, в – ФРТ нормирована на дифракционный максимум, б, з – на осевое значение

Задача создания лазерной опорной звезды тянет за собой целый шлейф научных и технических проблем, таких как создание специализированного лазерного устройства, выбор оптимальной высоты размещения этой опорной звезды, измерение фазы отраженного атмосферой лазерного излучения и, наконец, выбор управляющего алгоритма.

В этой связи очень показательным является заявление [51] одного из известных в США разработчиков таких систем доктора Роберта Фугейта, в том, что в период написания доклада (февраль 1996) ему не были неизвестны успешно работающие лазерные опорные звезды, использующие рассеяние от натриевых облаков. Хотя именно натриевые опорные звезды способны обеспечить наилучшие характеристики для адаптивных телескопов.

Первые работы по этой проблеме в СССР были выполнены более 15 лет назад (см. библиографию в [14, 24, 45]). Однако только в последние годы эти исследования получили реальные перспективы для эксперимента. В связи с этим при разработке дизайн-проекта российского телескопа АСТ-10 были исследованы возможности работы такого телескопа при использовании лазерных опорных звезд. На рис. 5 приведены расчеты ФРТ для телескопа АСТ-10, работающего в условиях использования лазерной опорной звезды. Однако здесь предполагалось, что существует параллельный канал измерения флуктуаций общего наклона волнового фронта («tip-tilt»), поскольку лазерная опорная звезда не дает эту информацию.

4.3. «Оптимальный» алгоритм коррекции «tip-tilt»

Использование лазерной опорной звезды увеличивает зону устойчивой работы адаптивной ОЭС. Но поскольку лазерная звезда формируется на конечной дальности, то возникает необходимость корректирования данных оптических измерений от лазерной звезды для обеспечения эффективной коррекции искажений для реальных астрономических объектов. Здесь опять возможно использование моделей атмосферы, которое необходимо:

- а) для оценки величины турбулентных искажений, располагающихся выше звезды, для определения оптимальной высоты формирования звезды;
- б) хотя бы для частичной компенсации «фокусного изопланатизма»;
- в) для выбора схемы формирования лазерной опорной звезды;
- г) для улучшения возможностей оценки «tip-tilt».

Безусловно, использование лазерных опорных звезд, формируемых в атмосфере на основе сигнала обратного рассеяния, связано с проблемой выбора оптимального алгоритма использования данных оптических измерений для коррекции случайного дрожания изображения звезд.

Эта проблема была поставлена мною буквально в последние месяцы. Наиболее полная библиография по отечественным работам в связи с созданием лазерных опорных звезд дана в [45, 48].

В фокальной плоскости телескопа дрожание изображения мы будем характеризовать случайным смещением положения центра тяжести интенсивности (при условии малости флуктуаций интенсивности) изображения звезды

$$\rho_F^{\text{пл}} = -\frac{F}{k\Sigma} \iint_{\Sigma} d^2 \rho \nabla_{\rho} S^{\text{пл}}(0, \rho). \quad (1)$$

В свою очередь, вектор измерения

$$\rho_M = \rho_c + \rho_F^{\text{сф}}, \quad (2)$$

где

$$\rho_c = \frac{1}{P_0} \int_0^x d\xi (x - \xi) \iint d^2 R I(\xi, \mathbf{R}) \nabla_R n_1(\xi, \mathbf{R}) \quad (3)$$

– положение центра тяжести сфокусированного на расстояние x от источника гауссова лазерного пучка. Считая, что лазерное излучение фокусируется в достаточно малое, не разрешаемое через атмосферу телескопом пятно, второе слагаемое (2)

$$\rho_F^{\text{сф}} = -\frac{F}{k\Sigma} \iint_{\Sigma} d^2 \rho \nabla_{\rho} S^{\text{сф}}(0, \rho) \quad (4)$$

представляет собой дрожание изображения точечного источника в фокальной плоскости телескопа. В формулах (1), (2), (4) верхние индексы «пл» и «сф» указывают, что расчеты характеристик оптического поля выполнены для плоских и сферических волн; k – волновое число излучения; F – фокусное расстояние объектива; x – высота формирования опорной звезды; Σ –

площадь апертуры объектива; S – флуктуации фазы оптической волны; I – интенсивность оптической волны; $n_1(\xi, R)$ – флуктуации показателя преломления атмосферы.

Будем конструировать алгоритм коррекции дрожания изображения звезды в виде

$$\rho_k = A\rho_m, \quad (5)$$

обеспечивая минимум дисперсии остаточных искажений:

$$\langle (\rho_F^{\text{пл}} - A\rho_m)^2 \rangle = \langle (\rho_F^{\text{пл}})^2 \rangle + A^2 \langle (\rho_m)^2 \rangle - 2A \langle \rho_m \rho_F^{\text{пл}} \rangle. \quad (6)$$

Находя минимум для дисперсии в виде (6), имеем

$$\langle \beta^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_F^{\text{пл}} - A\rho_m)^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_F^{\text{пл}})^2 \rangle - A \langle \rho_m \rho_F^{\text{пл}} \rangle, \quad (7)$$

где корректирующий коэффициент A выражается только через детерминированные функции

$$A = \langle \rho_m \rho_F^{\text{пл}} \rangle / \langle (\rho_F^{\text{пл}})^2 \rangle. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что традиционный алгоритм коррекции, где $A = 1$, естественно, не обеспечивает минимума дисперсии (6) и поэтому не может рассматриваться как сколь угодно серьезная альтернатива.

В реальном эксперименте, как правило, мы имеем только данные измерений ρ_m , поскольку вектор $\rho_F^{\text{пл}}$, характеризующий дрожание реальной звезды, изображение которой и необходимо скорректировать, мы не можем измерить, так как реальная звезда дает слишком мало света для измерений с помощью датчика волнового фронта.

Вместе с тем коэффициент A может быть рассчитан, исходя из модельного описания высотного распределения интенсивности турбулентности.

Далее необходимо сказать несколько слов о возможных схемах формирования лазерных опорных звезд. Таких схем предложено несколько, но с точки зрения расчета дисперсии и корреляции из (8) можно говорить о двух, как о предельных: о моностатической схеме, когда формирование изображения звезды в телескопе и лазерной опорной звезды происходит через одни и те же неоднородности атмосферы, и бистатической схеме, когда опорная звезда формируется в изопланарной области для наблюдаемой (естественной) звезды, но само распространение фокусированного лазерного пучка, формирующего опорную звезду, происходит через турбулентные неоднородности, некоррелирующие с теми, что находятся на пути формирования естественной звезды.

4.3.1. Моностатическая схема формирования лазерной опорной звезды

В соответствии с формулами (1)–(7) минимальная дисперсия остаточных флуктуаций угловых смещений изображения звезды для моностатической схемы дается в виде

$$\langle \beta^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_F^{\text{пл}})^2 \rangle \left\{ 1 - \frac{2^{1/3} f(x, C_n^2)}{[1 + b^{-1/3} - 2^{7/6}(1 + b^2)^{-1/6}]} \right\}, \quad (9)$$

где $b = a_0/R_0$ (a_0, R_0 – диаметры лазерного пучка и апертуры телескопа);

$$f(x, C_n^2) = \frac{\left(\int_0^x d\xi C_n^2(\xi) \left[(1 - \xi/x)(1 + (1 - \xi/x)^2)^{-1/6} - (1 - \xi/x) \right] \right)^2}{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi) \int_0^x d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/x)^{5/3}}. \quad (10)$$

Таким образом, можно ожидать эффективную коррекцию с моностатической схемой формирования опорной звезды только для достаточно больших высот фокусировки лазерного пучка, при этом оптимальный размер фокусированного пучка $a_0 \rightarrow R_0$.

На основании знаний моделей высотного профиля турбулентности можно утверждать, что моностатическая схема позволяет:

1. Оценить предельный уровень коррекции общего наклона волнового фронта с помощью выражения (9), где второе слагаемое оценивается на основе моделей турбулентной атмосферы.
2. Оценить коэффициент A пересчета измеряемых значений ρ_m в управляющий алгоритм, выражаемый через средние значения:

$$A = \langle \rho_m \rho_F^{nn} \rangle / \langle (\rho_F^{nn})^2 \rangle .$$

4.3.2. Бистатистическая схема формирования

Для такой схемы характерно, что формирование лазерной звезды осуществляется через турбулентные неоднородности, некоррелирующие с теми неоднородностями, через которые формируется изображение звезды в телескопе. Это может быть реализовано за счет боковой подсветки лазером (при достаточно большом выносе оптической оси распространения лазерного пучка от оптической оси телескопа). Используя ту же процедуру поиска минимума дисперсии остаточных флуктуаций дрожания изображения и выполняя аналогичные вычисления, что и для моностатической схемы, имеем

$$\langle \beta^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_F^{nn})^2 \rangle \left\{ 1 - \frac{2^{1/3} f_1(x, C_n^2)}{[1 + b^{-1/3}]} \right\}, \quad (11)$$

где

$$f_1(x, C_n^2) = \frac{\left(\int_0^x d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/x) (1 + (1 - \xi/x)^2)^{-1/6} \right)^2}{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi) \int_0^x d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/x)^{5/3}}. \quad (12)$$

Как показывает анализ последних выражений, эффективная коррекция с бистатистической схемой формирования опорной звезды гарантирует минимальную дисперсию остаточных дрожаний изображения (11) при коррекции вида (5). Видно, что, в отличие от моностатической схемы, коррекция по бистатистической схеме эффективна при любом соотношении a_0/R_0 , но коррекция тем лучше, чем больше величина b (см. (11)). Поэтому следует ожидать хорошую коррекцию по бистатистической схеме. Кроме того, при любых значениях b ($b = a_0/R_0$) ρ_m никогда не обращается тождественно в нуль.

Проводить сравнительное сопоставление двух предельных схем формирования лазерных опорных звезд можно только путем конкретных оценок. И здесь следует заметить, что это необходимо делать уже не для отдельного телескопа (с адаптивной оптикой), а для целой обсерватории, например для обсерватории на горе Мауна Кия на Гавайях, где расположены три крупнейших телескопа, работающих с адаптивной коррекцией турбулентных искажений: Кекк-1, Кекк-2, СНФТ. Первые два с апертурой 10 м, а телескоп СНФТ (Канада–Гавайи–Франция) с апертурой 3,6 м.

Взаимное расположение этих телескопов таково, что при работе по моностатической схеме для каждого из телескопов дисперсия остаточных искажений рассчитывается по формуле (9).

Если телескоп Кекк-1 формирует бистатистическую звезду для телескопа Кекк-2 (расстояние между телескопами примерно 85 м), то имеем

$$\langle \beta^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_F^{nn})^2 \rangle \left\{ 1 - 2^{-2/3} f_1(x, C_n^2) \right\};$$

если же Кекк-2 создает звезду для телескопа СНФТ, тогда

$$\langle \beta^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_F^{nn})^2 \rangle \left\{ 1 - \frac{2^{1/3} f_1(x, C_n^2)}{1 + (10/3,6)^{-1/3}} \right\};$$

если же СНФТ представляет собой звезду для пары Кекк-1/Кекк-2, то

$$\langle \beta^2 \rangle_{\min} = \langle (\rho_{\text{F}}^{\text{пл}})^2 \rangle \left\{ 1 - \frac{2^{1/3} f_1(x, C_n^2)}{1 + (3,6/10)^{-1/3}} \right\}.$$

Таким образом, суммируя все результаты, можно сформулировать следующие выводы:

1. Моностатическая схема практически не пригодна для коррекции общего наклона волнового фронта на апертуре телескопа.
2. Бистатическая схема дает практически ощутимую коррекцию общего наклона.
3. Оптимальная коррекция, построенная на использовании информации о вертикальных профилях интенсивности турбулентности, обладает безусловной эффективностью. В то же время как «прямая» коррекция в ряде случаев может даже увеличить искажения.

В целом эти результаты являются красноречивым подтверждением того, что модели атмосферы должны использоваться на всех этапах проектирования, построения и функционирования современных оптико-электронных систем.

Основные результаты, полученные по данной проблеме, опубликованы авторским коллективом в работах [2, 13–50].

Автор выражает свою глубокую признательность сотрудникам лаборатории прикладной и адаптивной оптики Института оптики атмосферы СО РАН: О.Н. Емалееву, Н.Н. Ботыгиной, Б.В. Фортецу, Ф.Ю. Каневу, Л.В. Антошкину, Л.Н. Лавриновой, Е.В. Носову.

1. Щеглов П. В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980. 271 с.
2. Лукин В. П., Емалеев О. Н. и др. // *Астрономический журнал*. 1983. Т. 60. N 4. С. 790–795.
3. Coulman C. E., Vermin J. // *Appl. Optics*. 1988. V. 27. N 1. P. 155–160.
4. Good R., Beland R. // *Proc. SPIE*. 1988. V. 982. P. 165–186.
5. McKechnie T. Stewart. // *J. Opt. Soc. Am.* 1992. V. 9. N 11. P. 1937–1954.
6. Site Testing for the VLT // *ESO VLT Report*. N 60. 1990.
7. ESO VLT Report. N 55. 1986.
8. Murtaqh F., and Sarazin M. Nowcasting astronomical seeing: A study of ESO La Silla and Paranal. ESO Scientific preprint. N 934. 1993.
9. Lopez B., and Sarazin M. Optimum exposure times for interferometry. ESO Scientific preprint. N 36. 1991.
10. ICO-16 Satellite Conference on «Active and Adaptive Optics» // *Proc. ESO*. 1993.
11. *Adaptive Optics in Astronomy* // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2201.
12. *Adaptive Optics* // *Technical Digest Series. OSA/ESO*. 1995. V. 23.
13. Лукин В. П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 1–2. С. 280–290.
14. Лукин В. П. *Атмосферная адаптивная оптика*. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с. (Lukin V.P. *Atmospheric Adaptive Optics*. SPIE Press V.PM 23. 285 p. 1996).
15. Lukin V. P., Zuev V. E. // *Appl. Optics*. 1987. V. 27. N 1. P. 139–147.
16. Лукин В. П. // *Квантовая электроника*. 1988. Т. 15. N 9. С. 1856–1861.
17. Лукин В. П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т. 5. N 4. С. 354–377.
18. Лукин В. П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т. 5. N 12. С. 1294–1304.
19. Лукин В. П., Майер Н. Н., Фортец Б. В. // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т. 5. N 12. С. 1241–1251.
20. Lukin V., Fortes B. // *Proc. of SPIE*. 1992. V. 1688. P. 477–488.
21. Lukin V. P. // *OSA Digest Series*. 1992. V. 19. P. 243–245.
22. Lukin V., Fortes B. // *OSA Digest Series*. 1992. V. 19. P. 79–82.
23. Лукин В. П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1993. Т. 6. N 9. С. 628–631.
24. Lukin V. P. // *Proc. ICO*. 1993. P. 521–524.
25. Lukin V. // *Proc. SPIE*. 1993. V. 1968. P. 327–336.
26. Lukin V. P., Fortes B. V., Kanev F. Yu., Konyaev P. A. // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1994. V. 11. N 2. P. 903–907.
27. Lukin V. P. // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2201. P. 46–55.
28. Lukin V. P. // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2200. P. 384–395.
29. Lukin V. P., Fortes B. V., Kanev F. Yu. // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2201. P. 768–775.
30. Lukin V. P., Fortes B., Kanev F., Konyaev P. // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2222. P. 522–526.
31. Lukin V. P. // *Proc. SPIE*. 1994. V. 2222. P. 527–535.
32. Lukin V. P. *Atmospheric adaptive optics applications* // *Adaptive Optics for Astronomy*, Klumer Acad. Publisher, Netherland, 1994. P. 59–65.
33. Lukin V. P., Fortes B., Kanev F. // *Proc. SPIE*. 1995. V. 2375. P. 00–00.
34. Lukin V. P. // *Proc. SPIE*. 1995. V. 2471. P. 00–00.
35. Lukin V. P. // *OSA Techn. Digest*. 1995. V. 23. P. 192–194.
36. Lukin V. P., Fortes B. // *OSA Techn. Digest*. 1995. V. 23. P. 92–93.
37. Лукин В. П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 3. С. 301–341.
38. Лукин В. П., Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Фортец Б. В. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 3. С. 409–418.
39. Лукин В. П., Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Фортец Б. В. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 3. С. 419–428.
40. Лукин В. П., Канев Ф. Ю., Коняев П. А., Фортец Б. В. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 3. С. 429–434.

41. Lukin V. P., Fortes B. // Pure and Appl. Optics. 1996. V. 5. P. 301–311.
42. Лукин В. П., Фортес Б. В. // *Астрономический журнал*. 1996. Т. 73. N 3. С. 409–425.
43. Лукин В. П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. N 11. С. 1433–1442.
44. Лукин В. П., Фортес Б. В. // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. N 11. С. 1492–1504.
45. Lukin V. P. // Proc. OSA. 1996. P. AMB35-1 – AMB35-5.
46. Lukin V. P., Fortes B. // Proc. OSA. 1996. P. 211–214.
47. Lukin V. P. // Proc. OSA. 1996. P. 150–152.
48. Лукин В. П., Фортес Б. В. // *Оптика атмосферы и океана*. 1997. Т. 10. N 1. С. 56–68.
49. Лукин В. П., Фортес Б. В., Носов Е. В. // *Тезисы III Межреспубликанского симпозиума «Оптика атмосферы и океана»*. Томск. 1996. С. 31–33.
50. Лукин В. П., Фортес Б. В., Носов Е. В. // *Тезисы III Межреспубликанского симпозиума «Оптика атмосферы и океана»*. Томск, 1996. С. 33–34.
51. Fugate R. 1996 Technical Digest Series. 1996. V. 13. P. 90–92.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
20 января 1997 г.

V. P. Lukin. Models of the Atmosphere and Adaptive Optoelectronic Systems. (Use of Atmospheric Models by Recent AOES)

Use of information on the atmosphere by designers of current AOESs at all stages of their development and operation is analyzed in the paper. The most important investigations in this area, including the author's works, are reviewed.