

На правах рукописи



Большасова Лидия Адольфовна

**АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ
ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО
ОПОРНОГО ИСТОЧНИКА**

Специальность 01.04.05 – «Оптика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в очной аспирантуре ГОУ ВПО «Томский государственный университет» на кафедре оптико-электронных систем и дистанционного зондирования и в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Лукин Владимир Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Якубов Владимир Петрович
доктор физико-математических наук
профессор Белов Владимир Васильевич

Ведущая организация: ФГУП НПО Астрофизика, г. Москва

Защита состоится 8 октября 2009 г. в 14 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан 7 сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пойзнер Б.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Возрастающий интерес и необходимость получения все большего объема информации о процессах и явлениях, происходящих в глубинах Вселенной, вместе с наличием соответствующих технологических возможностей, приводят к созданию все более крупных и совершенных оптических телескопов наземного базирования. При этом неотъемлемым элементом современного астрономического телескопа становятся системы адаптивной оптики (АО), предназначенные для достижения качества изображения, близкого к дифракционному, в реальном масштабе времени.

Работа таких оптико-электронных систем базируется на получении информации об искажения вносимых турбулентной атмосферой в структуру оптического излучения, получить которую можно путем анализа волнового фронта излучения, принятого от опорного источника. Наиболее перспективным, призванным удовлетворить требования поставленных задач, является оснащение адаптивного телескопа дополнительной системой формирования искусственного источника опорной волны, на основе обратного рассеяния лазерного излучения в атмосфере, получившего название лазерная опорная звезда (ЛОЗ) [1]. При этом способ формирования искусственного источника опорной волны, идеология и методология извлечения из него информации об атмосферных искажениях в канале распространения излучения во многом определяют структуру и эффективность работы АО-системы в целом.

Системы ЛОЗ активно разрабатываются более 20 лет, и как следствие к настоящему моменту опубликовано большое количество работ, в основном за рубежом, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям в этом направлении. Данной теме посвятили работы многие авторы, например F. Roddier, R. Fugate, M. Roggemann, B. Ellerbroek, R. Ragazzoni, D. Fried, R. Foy, C. Danty, В.П. Лукин, М.С. Беленький, А.А. Токовинин.

Неоднократно указывалось, что эффективность соответствующих АО-систем с ЛОЗ ограничена главным образом фокусным и угловым неизопланатизмом, а также невозможностью измерения и коррекции наклона волнового фронта на основе данных измерения от искусственного опорного источника [2]. При этом, несмотря на большое число публикаций, посвященных поискам путей решения указанных выше проблем, они остаются актуальными и требуют дальнейшего развития методов АО-коррекции.

Необходимо отметить, что указанные выше проблемы тесно связаны с рядом теоретических задач, удовлетворительное решение которых до настоящего времени не получено. Это обусловлено в первую очередь тем, что адаптивная оптическая коррекция на основе искусственного опорного источника мало исследована аналитическими методами.

С одной стороны, существует множество работ, посвященных АО-коррекции с ЛОЗ, в то же время значительная их часть, например [3], акценти-

рует внимание на отдельных технических аспектах функционирования АО-систем с ЛОЗ или на работе конструктивных элементов, например корректоров волнового фронта [4]. Подавляющее количество публикаций посвящено численному исследованию работы АО-систем с ЛОЗ, где атмосферная турбулентность моделируется фазовыми экранами [5], и лишь в незначительном количестве представлены работы, посвященные аналитическим исследованиям в области адаптивной коррекции атмосферных искажений. Это в первую очередь работы, выполненные в Институте оптики атмосферы СО РАН начиная с конца 70-х гг., в частности монография [6], значительно позже опубликованная за рубежом [7] и не утратившая своего научного значения на сегодняшний день.

В связи с этим целесообразным для дальнейшего развития методов адаптивной коррекции атмосферных искажений с ЛОЗ представляется исследование аналитическими методами эффективности и ограничений адаптивной коррекции на основе различных типов искусственных опорных источников с использованием моделей высотного профиля атмосферной турбулентности, соответствующих реальным условиям астрономических обсерваторий. Все эти исследования необходимы для решения указанных выше проблем при использовании ЛОЗ, устранение которых позволит сделать работу АО с ЛОЗ более эффективной. Это, безусловно, является в настоящее время актуальным и составляет научную задачу, имеющую теоретическое и важное прикладное значение.

Таким образом, **целью работы** являлось развитие методов адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений на основе искусственного опорного источника – лазерной опорной звезды.

В диссертационной работе решались следующие **основные задачи**:

Получить в форме, удобной для практического использования, аналитические выражения, позволяющие исследовать эффективность астрономического оптического наземного телескопа в условиях адаптивной коррекции с одним и несколькими искусственными опорными источниками, а также в ее отсутствие.

Исследовать эффективность и определить предельные возможности АО-коррекции атмосферных искажений изображения на основе различных видов опорных источников с использованием моделей вертикального профиля атмосферной турбулентности, соответствующих крупным астрономическим обсерваториям.

Исследовать ограничения, связанные с угловым неизопланатизмом волнового фронта при модовой коррекции атмосферных искажений. Получить аналитические выражения для функции пространственной корреляции фазовых aberrаций, определяющих основное влияние атмосферной турбулентности на качество формируемого изображения.

Исследовать ограничения, связанные с измерением и коррекцией наклона волнового фронта на основе искусственного опорного источника без допу-

щений о неподвижности ЛОЗ. Получить аналитические выражения для дисперсии дрожания изображения ЛОЗ с учетом флуктуаций самого источника.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось на основе теоретических подходов, применяемых при решении задач распространения оптических волн в турбулентной атмосфере, позволяющих получать аналитические результаты. В диссертационной работе используются положения и математический аппарат теории формирования оптического изображения, разделы теории лазерной локации, вычислительные методы программного пакета аналитических и численных вычислений «Mathematica 5.0».

Положения, выносимые на защиту

1. Действие адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений при использовании одного искусственного опорного источника, сформированного фокусировкой лазерного излучения, эквивалентно увеличению когерентной зоны апертуры телескопа и определяется соотношением:

$$\left[\frac{\int_0^x d\xi C_n^2(\xi) (\xi/x)^2}{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi)} \right]^{-1/2},$$

где $C_n^2(\xi)$ – высотный профиль атмосферной турбулентности; x – высота формирования ЛОЗ.

Применение нескольких опорных звезд, сформированных на одной высоте, делает возможным создание когерентной апертуры телескопа любого размера.

2. При модовой коррекции атмосферных искажений размер области углового изопланатизма определяется наивысшим порядком аберраций волнового фронта, которые компенсируются адаптивной оптической системой. Размер этой области прямо пропорционально зависит от размера апертуры телескопической системы. При фазовой коррекции только наклонов волнового фронта учет конечности внешнего масштаба турбулентности уменьшает область изопланатизма фазовых флуктуаций.

3. Дисперсия случайного дрожания изображения точечного искусственного опорного источника с флуктуирующим положением центра пропорциональна дисперсии дрожания изображения неподвижного точечного источника, а также зависит от эффективного размера лазерного пучка, формирующего звезду, размера приемной апертуры телескопа и дисперсии дрожания пучка в плоскости формирования опорного источника.

Достоверность научных положений и других результатов диссертации обеспечивается строгостью используемых математических постановок

задач, корректным использованием аналитических методов расчета и признанных моделей профиля атмосферной турбулентности, теоретическим обоснованием полученных результатов и выводов. Подтверждается согласованием с физическими представлениями о распространении оптического излучения в турбулентной атмосфере, а также согласием с экспериментальными данными, представленными в работах других авторов: В. Ellerbroek, J. Marshall, A. Tokovinin.

Новизна научных положений и других результатов

Первое научное положение есть результат исследования эффективности адаптивной фазовой коррекции на основе различных видов опорных источников, новизна которого обусловлена решением задачи аналитически. Выполнены численные исследования эффективности такой коррекции с использованием признанных модельных зависимостей профиля атмосферной турбулентности для крупных астрономических обсерваторий. Установлены предельные возможности фазовой коррекции на основе опорного источника, сформированного фокусировкой лазерного излучения, обусловленные влиянием фокусного неизопланатизма.

Второе положение отражает идею определять область углового неизопланатизма при модовой коррекции через допустимый угловой разнос, эквивалентный порядку фазовых аберраций волнового фронта, которые должны быть скомпенсированы АО-системой, в противоположность традиционно используемому изопланатическому углу. В литературе подобные выводы отсутствуют. Обнаружена зависимость размера этой области от внешнего масштаба турбулентности и размера апертуры телескопа. Сформулированы требования к быстрдействию АО-системы при модовой коррекции.

Третье положение есть результат аналитического решения задачи о величине дисперсии дрожания ЛОЗ в новой постановке – сняты допущения о неподвижности искусственного опорного источника, которая до сих пор никем не решалась. Установлено, что дисперсия дрожания изображения искусственного опорного источника сферической волны с флуктуирующим положением источника меньше, чем дисперсия дрожания изображения неподвижной сферической волны.

Кроме того, предложено для повышения эффективности работы АО-систем формировать ЛОЗ лазерным пучком, соизмеримым с апертурой телескопа, а в качестве опорных источников использовать только его фрагменты (конструкция ориентированного по полю датчика волнового фронта).

Научная ценность защищаемых положений и других результатов

Ценность первому положению придает аналитическое выражение, которое позволяет на основе информации о профиле атмосферной турбулентности в месте расположения телескопа оценить эффективность адаптивной фазовой коррекции и выбрать оптимальную высоту формирования ЛОЗ.

Второе положение показывает необходимость для определения размера области «углового неизопланатизма» при модовой коррекции атмосферных

искажений учитывать порядок наивысшей корректируемой моды и размер апертуры телескопа, а при коррекции наклонов волнового фронта – конечность величины внешнего масштаба турбулентности.

Третье положение дает теоретическую основу для решения «проблемы компенсации наклонов волнового фронта» по данным измерений от искусственного опорного источника – ЛОЗ.

В работе показаны возможности повышения эффективности адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений на основе искусственного опорного источника.

Практическая значимость определяется возможностью использования результатов данной работы при создании и работе АО-систем с ЛОЗ для астрономических телескопов и других оптико-электронных систем, работающих в турбулентной атмосфере.

Полученные аналитические выражения для параметра Штреля в форме, удобной для практического использования, позволяют на основе информации о профиле атмосферной турбулентности в местоположении системы выполнять исследование эффективности астрономического телескопа, эффективности коррекции адаптивной фазовой коррекции на основе одиночного искусственного опорного источника, сформированного сфокусированным лазерным пучком, и нескольких опорных источников, сформированных на одной высоте, а также определять оптимальные параметры ЛОЗ – высоту формирования, длину волны излучения.

Полученные аналитические зависимости для пространственной корреляции модовых составляющих волнового фронта излучения позволяют оперативно оценить предельно допустимое угловое расстояние между ЛОЗ и астрономическим объектом или несколькими опорными источниками при модовой АО-коррекции.

Полученные аналитические выражения для дисперсии дрожания ЛОЗ с учетом флуктуаций положения самого источника позволяют проводить оценки этой величины в реальных атмосферных условиях.

Использование предложенного алгоритма фазовой коррекции, широкого лазерного пучка размером, сравнимым с апертурой телескопа для формирования ЛОЗ, и ориентированного по полю датчика волнового фронта к извлечению информации об атмосферных искажениях позволит повысить эффективность АО-коррекции на крупных телескопах.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы обсуждались: на международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Бурятия 2007; Красноярск, 2008), международных симпозиумах «SPIE Europe Symposium on Remote Sensing» (Италия 2007; Великобритания 2008, Германия 2009), «SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2008» (Франция 2008), 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine (Ирлан-

дия 2007), международных школах – семинар молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» (Томск 2006; Красноярск 2008), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2008), Международной школе-конференции «Turbulence mixing and Beyond» (Италия 2009).

По материалам диссертации опубликовано 19 работ, из них 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 статьи в трудах SPIE, 3 статьи в трудах международных конференций, 7 тезисов докладов конференций.

Реализация и внедрение результатов

Исследования поддерживались грантом фонда Министерства образования и науки РФ: в рамках программы УМНИК (2008 г.), грантом РФФИ № 08-05-09327 «Моб_з», грантом SPIE для поездки на международный симпозиум «Remote Sensing», 2008 г.

Результаты работы использованы при выполнении гранта РФФИ № 08-05-99019-р_офи, а также в следующих проектах и программах РАН, СО РАН: Проект «Распространение, формирование лазерных пучков и прием оптических изображений в атмосфере, как стратифицированной, рассеивающей и турбулентной среде при управлении параметрами излучения и приемных устройств. Атмосферная коррекция искажений и решение обратных задач оптики атмосферы с учетом многократного рассеяния излучения», № Госрегистрации 01.20.03 02786; Программа Президиума РАН № 16 «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля» в части 3; Проект «Дневной астроклимат Сибири и проблемы построения адаптивного телескопа»; Комплексный интеграционный проект СО РАН № 3.2 «Развитие адаптивных систем коррекции изображения для наземных телескопов».

Материалы диссертации в частях, касающихся повышения эффективности адаптивной фазовой коррекции, используются в работах, проводимых в Южной Европейской обсерватории на телескопе Сьерра Параналь (Чили).

Вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены при непосредственном участии соискателя.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения; общий объем работы 138 страниц; работа содержит – 13 таблиц и 44 рисунка; список цитируемой литературы включает 152 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, методы исследований, приведены научные положения, выносимые на защиту, новизна, научная ценность и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорный характер и содержит необходимые для понимания оригинальной части работы сведения из теории атмосферной адаптивной оптики и распространения оптических волн в турбулентной атмосфере. Сделан литературный обзор, позволяющий оценить современное состояние исследований, которым посвящена диссертационная работа.

В разд. 1.1 изложены принципы работы АО-систем для атмосферных приложений. Рассматриваются типы искусственных опорных источников в АО-системах и методы их создания для астрономических приложений. Такие источники формируются на основе рэлеевского обратного рассеяния лазерного излучения в атмосфере или на высотах 90–100 км в слое натрия атмосферы и получили соответствующие названия – рэлеевская ЛОЗ и натриевая ЛОЗ соответственно. Отмечено, что АО с ЛОЗ становятся неотъемлемым элементом астрономического телескопа. Данные о современных АО-системах с ЛОЗ крупных астрономических телескопов представлены в Приложении.

В разд. 1.2 анализируются факторы, ограничивающие эффективность АО-систем с ЛОЗ: фокусный и угловой неизопланатизм, неопределенность наклона волнового фронта.

Поскольку сферический волновой фронт от точечного искусственного опорного источника, распространяющийся назад к апертуре телескопа, не проходит через ту же самую часть атмосферы, что плоский волновой фронт от астрономического объекта, при этом фазовые флуктуации плоской и сферической волн имеют существенные различия, то, как следствие, отображаться они будут в разных плоскостях и будет иметь место неполная компенсация атмосферных искажений. Это явление в результате неизбежно приводит к деградации работы АО-системы и получило название «фокусный неизопланатизм».

Известно, что излучение от опорного источника должно проходить через те же атмосферные неоднородности, что и от астрономического объекта, поэтому когда опорный источник находится на угловом расстоянии, большем чем изопланатический угол толщи атмосферы, то, как следствие, он не несет полную информацию об атмосферных искажениях изображения наблюдаемого объекта. В результате это явление также приводит к деградации работы АО-системы и получило название угловой неизопланатизм. Однако такое определение не учитывает, что на практике имеет место модовая, т.е. частичная, фазовая коррекция искажений.

Все же главной проблемой АО с ЛОЗ считается невозможность измерения и коррекции глобального или общего наклона волнового фронта. Поскольку излучение от ЛОЗ проходит одни и те же атмосферные неоднородности дважды, в то время как луч от астрономического объекта только один раз, то принято считать невозможным разделить эти два вклада и получить данные для коррекции наклонов. Теоретической основой данного

утверждения являются аналитические расчеты, выполненные с рядом допущений, при отсутствии экспериментальных исследований.

Представлен обзор основных подходов к решению указанных выше проблем, предложенных ранее другими исследователями. Отмечена их актуальность в настоящее время и отсутствие результатов аналитического характера.

В разд. 1.3 изложены основные математические подходы к решению задач распространения оптического излучения в турбулентной среде, в том числе подходы, позволяющие получать аналитические результаты и используемые в диссертационной работе.

В разд. 1.4 представлены используемые для получения численных результатов в диссертационной работе модели высотных зависимостей структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы для различных астрономических обсерваторий.

В заключение главы обсуждается необходимость развития методов адаптивной коррекции атмосферных искажений с использованием искусственных опорных источников. Дается формулировка направления исследований.

Вторая глава посвящена исследованию эффективности адаптивной коррекции атмосферных искажений изображения астрономического объекта, формируемого оптической системой наземного телескопа через турбулентную атмосферу на основе различных типов искусственных опорных источников.

В качестве показателя эффективности выбран параметр Штреля, представляющий собой отношение средней интенсивности на оси системы в случайно-неоднородной среде к интенсивности в вакууме. Для описания поля излучения, прошедшего турбулентную атмосферу после АО-коррекции и без коррекции, использовался обобщенный метод Гюйгенса–Кирхгофа, а при оценке интенсивности поля – фазовое приближение этого метода. Фазовые флуктуации оптической волны описывались в приближении геометрической оптики.

В этом приближении, предполагая, что основным искажающим фактором является атмосферная турбулентность, в разд. 2.1 получено аналитическое выражение для параметра Штреля астрономического телескопа в отсутствие адаптивной коррекции. Показано, что ключевым параметром здесь становится радиус когерентности плоской волны $r_0^{\text{пл}}$, рассчитывающийся по всей толще среды.

В разд. 2.2 исследуется эффективность адаптивной коррекции искажений, осуществляемых на основе алгоритма фазового сопряжения с использованием данных измерения волнового фронта от ЛОЗ, сформированной фокусировкой лазерного излучения, – традиционная АО-коррекция с ЛОЗ. Дан вывод выражения для параметра Штреля.

Распределение средней интенсивности поля в фокальной плоскости телескопа, формируемого естественной звездой, в результате адаптивной коррекции с использованием ЛОЗ описывалось в виде:

$$\begin{aligned} \langle I(-f, \mathbf{p}) \rangle = & \iint d^2 \mathbf{p}_1 d^2 \mathbf{p}_2 \exp\left(\frac{-\mathbf{p}_1^2}{2R^2}\right) \exp\left(\frac{-\mathbf{p}_2^2}{2R^2}\right) \times \\ & \times G_0(0, \mathbf{p}_1; -f, \mathbf{p}) G_0^*(0, \mathbf{p}_2; -f, \mathbf{p}) \exp\left(\frac{-ik\mathbf{p}_1^2}{2f} + \frac{ik\mathbf{p}_2^2}{2f}\right) \times \\ & \times \langle \exp\left\{i[S_{\text{пл}}(\mathbf{p}_1) - S_{\text{пл}}(\mathbf{p}_2)] - i[S_{\text{сф}}(x, 0; 0, \mathbf{p}_1) - S_{\text{сф}}(x, 0; 0, \mathbf{p}_2)]\right\} \rangle, \quad (1) \end{aligned}$$

где $G_0(0, \mathbf{p}_1; -f, \mathbf{p})$ – функция Грина для свободного пространства; $S(\mathbf{p})$ – фазовые флуктуации, обусловленные атмосферной турбулентностью.

Здесь был введен радиус когерентности поля при коррекции $R_0^{\text{пл}}$ с опорной сферической волной в виде

$$R_0^{\text{пл}} = r_0^{\text{пл}} \left[\frac{\int_0^x d\xi C_n^2(\xi) (\xi/x)^2}{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi)} \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

Здесь $C_n^2(\xi)$ – высотный профиль атмосферной турбулентности; x – высота формирования ЛОЗ. Отсюда следует, что действие АО-коррекции эквивалентно увеличению когерентной части апертуры телескопа, которое определяется выражением в квадратных скобках.

С использованием модельных зависимостей $C_n^2(\xi)$ проанализирована величина $R_0^{\text{пл}}$ для различных длин волн, типов ЛОЗ и высоты формирования опорного источника. Определены предельные возможности такой адаптивной коррекции, обусловленные влиянием фокусного неизопланатизма. Показано, что такая коррекция становится неэффективной ($St \leq 0,4$) для крупных телескопов с апертурой порядка 8 м. Обнаружено существование оптимальной высоты формирования рэлееской ЛОЗ в зависимости от интенсивности и распределения турбулентных флуктуаций.

В разд. 2.3 дан вывод выражения для параметра Штреля при адаптивной коррекции атмосферных искажений, осуществляемой на основе алгоритма фазового сопряжения с использованием данных измерения волнового фронта от нескольких опорных источников, сформированных на одной высоте – матрицы ЛОЗ.

В разд. 2.4 суммируются результаты аналитических расчетов параметра Штреля и приводятся в форме, удобной для практического использования. Для телескопа без коррекции

$$\text{St} \approx \left[1 + 4\pi^2 \frac{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi)(2R)^{-1/3}}{(\lambda / 2R)^2} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучения; в случае адаптивной фазовой коррекции на основе ЛОЗ, сформированной путем фокусировки излучения:

$$\text{St} \approx \left[1 + 4\pi^2 \frac{\int_0^x d\xi C_n^2(\xi)(\xi/x)^2 (2R)^{-1/3}}{(\lambda / 2R)^2} \right]^{-1}, \quad (4)$$

и при адаптивной фазовой коррекции на основе системы опорных источников, сформированных в виде упорядоченной решетки источников (матрицы ЛОЗ):

$$\text{St} \approx \left[1 + 4\pi^2 \frac{\int_0^x d\xi C_n^2(\xi)(\xi/x)^2 (2R)^{-1/3}}{N^{5/3} (\lambda/2R)^2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где N – линейный размер матрицы субапертур.

Представлены результаты численных расчетов эффективности телескопа на основе моделей $C_n^2(\xi)$ крупных астрономических обсерваторий. Исследовалась эффективность АО-коррекции при использовании различного числа опорных источников в условиях, соответствующих натриевой и рэлеевской ЛОЗ. Показано, что использование высот рэлеевского рассеяния требует большего числа опорных источников для достижения заданного уровня коррекции. Установлена высокая эффективность фазовой коррекции с применением матрицы ЛОЗ в отношении фокусного неизопланатизма. Основным результатом анализа является близость к полю, формируемому астрономическим объектом при увеличении числа субапертур. Таким образом, увеличивая число опорных источников в матрице ЛОЗ, можно практически для любого телескопа добиться значений параметра Штреля, сколь угодно близких к единице, т.е. сделать любую апертуру полностью когерентной.

Выполнено сопоставление с экспериментальными данными, полученными в обсерваториях, модели высотного профиля турбулентности которых были использованы в данных исследованиях, показавшее хорошее согласие. Отмечено, что учет влияния амплитудных флуктуаций, наряду с фазовыми флуктуациями, естественно, уменьшит предельно достижимый уровень коррекции, в итоге параметр Штреля будет несколько ниже.

В разд. 2.5 обсуждаются особенности применения различных лазерных пучков для формирования ЛОЗ, связанные с когерентностью формируемого от них излучения. Рассчитаны радиусы когерентности плоской и сферических волн для моделей высотных профилей атмосферной турбулентности, описанных в первой главе. Показана возможность использования отдельных фрагментов широких лазерных пучков в качестве опорных источников.

В заключение описаны основные результаты исследований, представленные в данной главе.

Третья глава посвящена исследованию структурных ограничений искусственных опорных источников: углового неизопланатизма при модовой коррекции и компенсации наклонов волнового фронта на основе данных от ЛОЗ.

Первая часть главы посвящена исследованию ограничений, обусловленных угловым неизопланатизмом при модовой коррекции атмосферных искажений, непосредственно связанных с задачей о допустимом угловом расстоянии между опорными источниками в матрице ЛОЗ. Задача решалась с использованием представления функции волновых аберраций в виде ряда по полиномам Цернике, где каждый член содержит информацию о пространственных свойствах фазовых флуктуаций.

В разд. 3.1.1 рассчитаны традиционно используемый в АО изопланатический угол θ_0 и связанные с ним величины для моделей профиля атмосферной турбулентности, представленных в первой главе, и проанализировано влияние высоты расположения телескопической системы на эти параметры. Сопоставлены условия изопланатизма в общей теории изображения и при формировании изображений сквозь турбулентную атмосферу.

В разд. 3.1.2 получены аналитические выражения для функции пространственной корреляции модовых составляющих фазовых флуктуаций, определяющих основное влияние атмосферной турбулентности на качество изображения: двух положений наклонов, комы и дефокусировки.

Представлены результаты численных исследований, свидетельствующие, что размер области изопланатизма в АО-системе более точно характеризовать не традиционно используемым изопланатическим углом, а допустимым угловым расстоянием, определяемым размером области пространственной корреляции фазовых искажений излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере. Эта область определяется порядком аберраций, которые должны быть скомпенсированы, и уменьшается с ростом номера моды (рис. 1–3).

На рис. 1–3 $b(\theta)$ – нормированная функция пространственной корреляции и параметр $\gamma = \theta h_\xi / D$ выступает в качестве аргумента, где θ – угловое расстояние; D – диаметр телескопа; h_ξ – эффективная толщина атмосферы. Подтверждением данного вывода являются также экспериментальные дан-

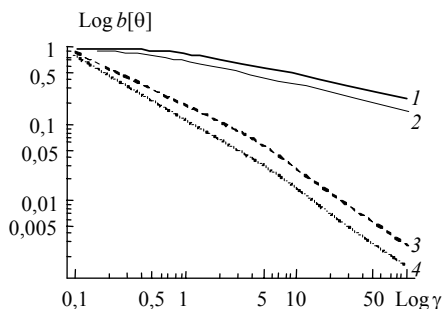


Рис. 1. Зависимость коэффициента пространственной корреляции для различных модовых составляющих флуктуаций фазы: двух положений наклонов волнового фронта (1 – Y, 2 – X), дефокусировки (3), комы (4)

ные измерений углов изопланатизма без и при АО-коррекции, полученные другими исследователями, но не нашедшие объяснения.

Выполнены исследования влияния внешнего масштаба инерционного интервала атмосферной турбулентности (рис. 2) и размера апертуры телескопа (рис. 3).

Показано, что величина внешнего масштаба $L_{0,*}$ турбулентности строго влияет на пространственную корреляцию низших модовых составляющих флуктуаций фазы, значения, полученные с бесконечным

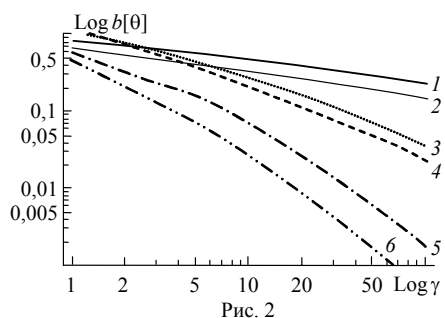


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость коэффициента пространственной корреляции для наклонов волнового фронта при различных значениях эффективного внешнего масштаба турбулентности $\chi_0 = 2\pi/L_{0,*}$,

$$(1 - Y, 2 - X, \chi = 0,3 - Y, \chi = 0,1; 4 - Y, \chi = 0,3; 5 - X, \chi = 0,1; 6 - X, \chi = 0,3)$$

Рис. 3. Зависимость коэффициента угловой корреляции для различных модовых составляющих флуктуаций фазы: наклон по оси X (1 – $D/r_{0,*}^{mn} = 50$; 2 – $D/r_{0,*}^{mn} = 20$) и дефокусировка (3 – $D/r_{0,*}^{mn} = 50$; 4 – $D/r_{0,*}^{mn} = 20$)

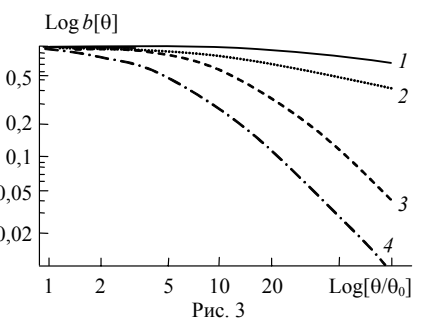


Рис. 3

внешним масштабом, существенно выше, чем в случае модели, зависимой от внешнего масштаба (см. рис. 2). Это способствует сокращению пригодного для использования поля зрения АО-системы. Обнаружено, что область, где сохраняется пространственная корреляция модовых составляющих и, как следствие, область углового изопланатизма, растет с увеличением размера апертуры телескопа (см. рис. 3).

Сформулированы требования к быстродействию АО-системы, обеспечивающей эффективную коррекцию, в случае совместного учета пространственно-временных ограничений адаптивного контура:

$$v(2H_{LGS}/c + \tau_a) \leq \theta_{is}^*, \quad (6)$$

где H_{LGS} – высота формирования ЛОЗ; c – скорость света в атмосфере; v – эффективная скорость ветра; τ_a – временная задержка адаптивной системы; θ_{is}^* – угол изопланатизма наивысшей корректируемой моды. Итак, временной отклик адаптивной системы и время распространения сигнала не должны превышать угла изопланатизма наивысшей корректируемой моды. При полной коррекции получаем $\theta_{is}^* = \theta_0$, где θ_0 – традиционно используемый изопланатический угол. Таким образом, частичная коррекция снижает требования к быстродействию адаптивного контура так, что они оказываются менее жесткими, чем при полной адаптивной коррекции в тех же условиях.

Во второй части главы рассматриваются ограничения, связанные с измерением и коррекцией наклона волнового фронта на основе искусственного опорного источника. Задача решается в новой постановке без допущений о неподвижности ЛОЗ, сделанных в ранее выполненных расчетах. Необходимость корректно рассчитать корреляцию интегральных и локальных флуктуаций была преодолена в рамках подхода на основе вариационных производных, где расщепление соответствующих корреляций основывается на применении формулы Фуруцу–Новикова.

В разд. 3.2.1 представлены аналитические исследования уровня остаточных искажений при адаптивной фазовой коррекции на основе искусственного опорного источника с учетом того, что ЛОЗ представляет собой сферический источник со случайным центром, а не неподвижный источник, как полагалось ранее. Мгновенное положение такого источника задавалось вектором-координатой $\mathbf{r}_{\text{лп}}$, определяющим положение центра тяжести проходящего через атмосферу лазерного пучка. В результате было обнаружено, что для апертур размера $R \sim \sqrt{\langle \rho_{\text{лп}}^2 \rangle}$ при фазовой коррекции флуктуации центра тяжести лазерного пучка не оказывают влияния на остаточные искажения при АО-коррекции.

В разд. 3.2.1 дан вывод аналитического выражения для дисперсии дрожания изображения искусственного опорного источника с учетом наличия флуктуаций положения центра ЛОЗ, поскольку расчет этой величины, выполненный ранее в предположении о неподвижности ЛОЗ, послужил теоретической основой утверждения о невозможности измерения и коррекции общего наклона волнового фронта. Установлено, что дисперсия дрожания изображения сферической волны с флуктуирующим положением источника меньше, чем дисперсия дрожания изображения неподвижной сферической волны через одинаковый турбулентный слой.

Представлены результаты асимптотического анализа полученного выражения для дисперсии случайного дрожания изображения сферической волны со случайным центром:

$$\langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle = \langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle_1 + \langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle_2, \quad (7)$$

где первый член из этой суммы характеризует дисперсию дрожания изображения неподвижного источника сферической волны, идущей из плоскости $X = 0$ в плоскость X . Его расчеты известны:

$$\langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle_1 = p^2 2^{7/6} 0,033 \Gamma(1/6) R^{-1/3} \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (\xi/X)^{5/3}, \quad (8)$$

а второй член $\langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle_2$ выражения (7) зависит как от размера самого лазерного пучка a , так и от дисперсии дрожания пучка $\sigma_{\text{лп}}^2$ в плоскости формирования ЛОЗ, а также от размера приемной апертуры телескопа R . В выражении (8) X – высота формирования ЛОЗ, $\Gamma(\dots)$ – гамма-функция. В результате проведенных преобразований и расчетов для второго слагаемого в (7) было получено:

$$\langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle = \langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle_1 [1 - F(\beta_0)] = \langle \varphi_{\text{сф}}^2 \rangle_1 \begin{cases} [1 - 7,33\beta_0^2 \Omega_t^{-7/6} f_1 f_2], & \sigma_{\text{лп}}^2 \rightarrow 0, \\ [1 - 1,76\beta_0^{-2/3} q^{-4/3} \Omega_t^{1/6} \Omega^{2/9}], & \sigma_{\text{лп}}^2 \rightarrow \infty, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\beta_0^2 = 0,31 C_n^2 X^{11/6} k^{7/6}; \quad \Omega_t = kR^2/X; \quad \Omega = ka^2/X; \\ f_1 f_2 = \begin{cases} (27/40)3/8, & a = R, \\ (27/40)^2 (a/R)^{-7/3}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{лп}}^2 = hX^3 a^{-1/3} \int_0^1 d\xi C_n^2(X\xi)(1-\xi)^2 \left[(1 - X\xi/F)^2 + \Omega^{-2}\xi^2 \right]^{-1/6}; \quad (11)$$

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число излучения; F – фокусное расстояние, и введены параметры, характеризующие дисперсию дрожания лазерного пучка:

$$h = 0,033 p^2 \Gamma(1/6) \cdot 2^{-5/6} \approx 1,017; \\ q = \int_0^1 d\xi C_n^2(X\xi)(1-\xi)^2 \left[(1 - X\xi/F)^2 + \Omega^{-2}\xi^2 \right]^{-1/6}. \quad (12)$$

Отмечено, что, используя реальные значения параметров в (9)–(12), можно описать любую атмосферную ситуацию. Анализ поведения функции $F(\beta_0)$ показал, что максимальное ослабление первого члена в выражении (7)

за счет действия второго члена происходит при промежуточном значении параметра β_0 . Эффект частичного уменьшения дрожания изображения ЛОЗ за счет дрожания положения ее источника обусловлен частичной компенсацией флуктуаций, связанных с распространением снизу вверх, за счет флуктуаций, обусловленных обратным распространением (сверху вниз) через одни и те же неоднородности атмосферы. Это может привести к возможности измерения наклона с использованием ЛОЗ, и сигнал от искусственного опорного источника может быть использован для коррекции наклона волнового фронта в телескопах.

В заключение описаны основные результаты исследований, представленные в данной главе.

Четвертая глава посвящена описанию разработанного в ходе выполнения диссертационной работы подхода к формированию и извлечению информации от искусственного опорного источника, который позволяет одновременно устранить влияние фокусного неизопланатизма и корректировать наклон волнового фронта с возможностью простого масштабирования на апертуру телескопов практически любого размера. Данный подход является одной из возможных реализаций системы опорных источников, сформированных на одной высоте, – матрицы ЛОЗ, высокая эффективность которой в отношении фокусного неизопланатизма была показана во второй главе.

В разд. 4.1 предложена конструкция ориентированного по полю датчика волнового фронта, где опорный источник формируется из набора сферических волн. Угловой размер каждой из этих сферических волн при превычислении на входной апертуре или в плоскостях измерения фазы приблизительно соответствует радиусу когерентности сферической волны, в результате измеренная фаза может быть восстановлена как гладкая функция. Выбор размера, числа и расстояния между субапертурами основывается на исследованиях, представленных в предыдущих главах.

Поскольку ЛОЗ всегда формируется на конечной высоте, возникает необходимость корректировки данных измерений от опорного источника для обеспечения эффективной коррекции, поэтому в разд. 4.2 предлагается алгоритм фазовой коррекции на основе алгоритма «оптимальной коррекции». Данные измерений волнового фронта от ЛОЗ нормируются весовым коэффициентом A , за счет выбора которого обеспечивается минимум дисперсии остаточных искажений от астрономического объекта и от ЛОЗ:

$$\langle [\Delta S_{\text{пл}} - A\Delta S_{\text{сф}}]^2 \rangle_{\min}, \quad (13)$$

где $\Delta S_{\text{сф}} = S_{\text{сф}}(\mathbf{p}_1) - S_{\text{сф}}(\mathbf{p}_2)$, и $\Delta S_{\text{пл}} = S_{\text{пл}}(\mathbf{p}_1) - S_{\text{пл}}(\mathbf{p}_2)$, где $S_{\text{пл}}(\mathbf{p}_1)$ – фазовые флуктуации плоского волнового фронта, формируемого астрономическим объектом на входной апертуре, и $S_{\text{сф}}(\mathbf{p}_1)$ – фазовые флуктуации сферического волнового фронта от ЛОЗ. При этом дисперсия остаточных искажений является мерой эффективности АО-коррекции. Оптимизирующий множи-

тель A может быть получен непосредственно в процессе оптического эксперимента на основе данных прямых измерений или как альтернатива расчетным путем на основе следующего выражения:

$$A_{\text{opt}} = \frac{\langle (\Delta S_{\text{пл}} \Delta S_{\text{сф}}) \rangle}{\langle (\Delta S_{\text{сф}})^2 \rangle} = \frac{\int_0^x d\xi C_n^2(\xi) \left(1 - \frac{\xi}{x}\right)}{\int_0^x d\xi C_n^2(\xi) \left(1 - \frac{\xi}{x}\right)^{5/3}}. \quad (14)$$

Для наглядной демонстрации результатов применения алгоритма были выполнены численные расчеты с использованием моделей профиля атмосферной турбулентности, представленных в первой главе. В качестве примера представлены результаты для трех моделей (таблица), где во второй колонке приведены значения дисперсии остаточных искажений волнового фронта, в третьей – значения, полученные на основе «алгоритма оптимальной коррекции», в четвертой – значения оптимизирующего коэффициента. Сопоставление полученных результатов свидетельствует о высокой эффективности алгоритма.

Эффективность коррекции волнового фронта

Модель высотного профиля атмосферной турбулентности	$\langle [\Delta S_{\text{пл}} - \Delta S_{\text{сф}}]^2 \rangle$	$\langle [\Delta S_{\text{пл}} - A \Delta S_{\text{сф}}]^2 \rangle$	A
Модель обсерватории Мауна-Кеа	131,9	0,005	0,041
Модель обсерватории Мауи	82,4	0,001	0,046
Модель Хафнагеля-Волли 5/7	703,7	0,012	0,086

В разд. 4.3 обсуждается возможность и оценивается эффективность определения наклона волнового фронта в результате анализа характеристик поля рассеянного лазерного излучения от искусственного опорного источника в рамках предложенного подхода. Показано, что измеренное дрожание отдельной субапертуры в матрице ЛОЗ обусловлено только распространением излучения через турбулентные флуктуации атмосферы на трассе от ЛОЗ до телескопа. Для оценки эффективности такой коррекции была рассчитана остаточная дисперсия угловых искажений волнового фронта. В численных исследованиях использованы модели профиля атмосферной турбулентности для астрономических обсерваторий.

В разд. 4.4 исследуются информационные возможности ЛОЗ путем оценки энергетических характеристик на основе модификации уравнения лазерной локации в рамках предложенного подхода. Рассматривались два типа ЛОЗ: рэлеевская и натриевая, численные расчеты выполнены для моделей профиля атмосферной турбулентности, представленных в первой главе. Установлено требование высокой мощности к лазерному источнику для

создания натриевой ЛОЗ в рамках предложенного подхода, в то время как применение рэлеевского рассеяния позволяет уменьшить эти требования. Выполнено сравнение полученных оценок с экспериментальными данными. Отмечено, что лазерные технологии интенсивно развиваются и можно ожидать появления новых высокомошных образцов, данные о современном состоянии лазерных технологий для создания ЛОЗ суммируются в Приложении. В результате был сделан вывод о целесообразности применять предложенный подход к ЛОЗ в условиях наилучшего астроклимата с точки зрения информационных возможностей, а не эффективности АО-коррекции.

В заключение описаны основные результаты исследований, представленные в данной главе.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе аналитического решения получены выражения для параметра Штреля, позволяющие анализировать ограничения, налагаемые турбулентной атмосферой на работу систем формирования изображений и (или) на эффективность адаптивной фазовой коррекции при использовании различных видов опорных источников на основе информации об интенсивности и распределении турбулентных флуктуаций, а также определять оптимальную высоту формирования опорного источника и длину волны излучения.

Исследована эффективность адаптивной фазовой коррекции на основе различных видов опорных источников с использованием моделей вертикального профиля атмосферной турбулентности для астрономических обсерваторий. Установлено, что применение адаптивной фазовой коррекции на основе ЛОЗ эквивалентно увеличению радиуса когерентности и может достигать до 20 раз в зависимости от профиля атмосферной турбулентности. Определены предельные возможности фазовой коррекции, обусловленные фокусным неизопланатизмом. Установлена эффективность коррекции с использованием матрицы ЛОЗ.

Исследован размер области углового неизопланатизма при модовой коррекции. Получены аналитические выражения для функции пространственной корреляции фазовых aberrаций, определяющих основное влияние атмосферной турбулентности на качество формируемого изображения. Сформулированы требования к быстродействию АО-системы при модовой коррекции. Показано, что компенсация низших модовых составляющих позволяет снизить требования к быстродействию адаптивного контура.

Получено аналитическое выражение дисперсии дрожания искусственного опорного источника с учетом флуктуаций положения ЛОЗ. Выполнен асимптотический анализ и установлено, что дисперсия дрожания изобра-

жения сферической волны с флуктуирующим положением источника меньше, чем дисперсия дрожания изображения неподвижной сферической волны. Это дает возможность измерения и адаптивной коррекции глобального наклона волнового фронта на основе искусственного опорного источника.

Предложен новый подход к формированию ЛОЗ и извлечению информации от такого источника, позволяющий устранить влияние фокусного неизопланатизма и корректировать наклон волнового фронта с возможностью масштабирования на телескоп любых размеров. Предложен алгоритм фазовой коррекции на основе ЛОЗ, и показана его эффективность. Выполнены оценки энергетических характеристик ЛОЗ путем модификации уравнения лазерной локации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thompson L., Gardner C.* Experiments on laser Guide Stars at Mauna Kea Observatory for Adaptive Optics in Astronomy // *Nature*. 1987. V. 328. P. 229–331.
2. *Foy R.* Laser guide stars: principle, cone effect and tilt measurement // *Opt. in Astrophys.* Springer. 2006. P. 249–273.
3. *Hugot E., Ferrari M., Vola P., Rabou P., Dohler K., Puget P., Hubin N.* Adaptive optics: stress polishing of topic mirrors for the VLT SPHERE adaptive optics // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. N 15. P. 2932–2941.
4. *Dainty C., Devaney N., Mackey R. et al.* Correction of ocular and atmospheric wavefronts: a comparison of the performance of various deformable mirrors // *Appl. Opt.* 2008. V. 47. Iss. 35. P. 6550–6562.
5. *Wu Han-Ling, Yan Hai-Xing, Li Xin-Yang, Li Shu-Shan.* Statistical interpolation method of turbulent phase screen // *Op. Express*. 2009. V. 17. Iss. 17. P. 14649–14664.
6. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1983. 250 с.
7. *Lukin V.P.* Atmospheric adaptive optics Bellingham. WA, SPIE. 1993. 250 p.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Большасова Л.А., Лукин В.П.** Лазерная опорная звезда и модели атмосферной турбулентности // *Оптика атмосфер. и океана*. 2007. Т. 20. № 12. С. 1096–1104.
2. **Большасова Л.А., Лукин В.П.** Адаптивная оптическая система с мезосферной лазерной опорной звездой // *Изв. вузов. Физ.* 2008. Т. 51. № 9/3. С. 56–57.
3. **Большасова Л.А., Лукин В.П.** Модовый изопланатизм фазовых флуктуаций // *Оптика атмосфер. и океана*. 2008. Т. 22. № 12. С. 1070–1075.
4. **Bolbasova L.A., Lukin V.P., Goncharov A.** Field-Oriented Wavefront Sensor for Laser Guide Stars // *Adaptive Optics for Industry and Medicine*. London: Imperial College Press, 2008. P. 495–501.
5. **Большасова Л.А., Лукин В.П.** Исследование эффективности применения лазерных опорных звезд // *Оптика атмосфер. и океана*. 2009. Т. 22. № 8. С. 807–814.
6. **Большасова Л.А., Лукин В.П., Носов В.В.** О дрожании изображения лазерной опорной звезды в моностатической схеме формирования // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 107. №5. С. 833–838.
7. **Bolbasova L.A., Lukin V.P.** Laser guide star and models of atmospheric turbulence // *Proc. SPIE*. 2007. V. 6936. P. 69360I-1–69360I-12.
8. **Bolbasova L.A., Lukin V.P.** New LGS for large aperture telescope // *Proc. SPIE*. 2007. V. 6747. P. 67470M-1–67470M-12.

9. **Bolbasova L.A., Lukin V.P.** Laser guide stars and models of atmospheric turbulence // Proc. SPIE. 2008. V. 7108. P. 71080H-1–71080H-10.
10. **Bolbasova L., Bonaccini D., Goncharov A., Lukin V.** Adaptive Optics with LGS and Mesospheric Layer Sensing // Proc. SPIE. 2008. V. 7015. P. 70152V-1–70152V-12.
11. **Bolbasova L., Goncharov A., Lukin V.** Field-Oriented Wavefront Sensor for Laser Guide Stars // 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. NUI, Galway, Ireland 12–15 June, 2007. P. 174–175.
12. **Большасова Л.А., Лукин В.П.** Адаптивная коррекция атмосферных искажений на основе искусственного опорного источника // Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды»: Сб. трудов. Красноярск, 22–29 июня 2008. С. 22–25.