

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

Физический факультет

*На правах рукописи*

**МОРАДИ МОХАММАД**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНИЗОПЛАТИЗМА АДАПТИВНОЙ  
ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ**

Специальность 01.04.21- лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2005

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Шмальгаузен Виктор Иванович

Официальные опоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Короленко Павел Васильевич

доктор физико-математических наук  
Воробьев Валерий Васильевич

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы СО РАН

Защита состоится 24 ноября 2005 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” октября 2005 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 501.001.31, доцент

Т.М. Ильинова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертационная работа посвящена моделированию систем адаптивной оптики, функционирующих в турбулентной атмосфере. Основное внимание уделено анизопланатизму адаптивной системы и роли дифракционных эффектов в атмосфере при исследовании анизопланатизма.

### **Актуальность проблемы**

Развитие адаптивной оптики на протяжении всей своей истории было стимулировано в первую очередь прикладными задачами. Такие проблемы как увеличение разрешающей способности наземных телескопов, компенсация искажений в интерферометрах, фокусировка лазерного пучка, создание систем внутриврезонаторной коррекции, улучшение работы систем оптической связи – типичные задачи, которые рассматривает адаптивная оптика. Эти общие задачи в свою очередь делятся на более конкретные частные задачи, одной из которых является задача коррекции изображений, полученных при наличии случайно-неоднородной среды между объектом и приемной апертуры оптической системы.

Хорошо изучены особенности искажений и методы их коррекции для систем, в которых угловой размер объекта не превышает размера изопланатической области. В таких системах фазовые искажения оптических волн, идущих через неоднородную среду от разных точек объекта, можно считать одинаковыми. Но если геометрические размеры объекта превышают размер изопланатической области, то оптические пути, по которым идут волны от разных точек такого объекта, различны. Следовательно, существенно различны и приобретаемые этими волнами фазовые искажения. Этот эффект называется анизопланатизмом оптической системы. В условиях анизопланатизма существенно затрудняются как регистрация, так и компенсация искажений, а методы, прекрасно зарекомендовавшие себя для изопланарных систем, перестают работать .

Интерес к явлению анизопланатизма в задачах астрономии был стимулирован, в первую очередь, возможностью исправить искаженное изображение слабого источника по наблюдениям фазовых искажений в изображении другого, значительно более яркого объекта (опорного источника). Такая возможность обусловлена корреляцией фазовых искажений волн, приходящих от разных объектов. Эта корреляция быстро убывает при увеличении углового расстояния между наблюдаемыми источниками, и поэтому возможности адаптивной коррекции изображений в условиях анизопланатизма ограничены.

Решать задачу о компенсации искажений в условиях анизопланатизма можно различными способами. В теоретических работах в большинстве случаев используется приближение геометрической оптики, которое не описывает флуктуаций амплитуды в атмосфере. Пренебрежение дифракционными эффектами далеко не всегда оправдано, тем более что область применимости геометрооптического приближения в задачах с анизопланатизмом изучена слабо. Так как эксперименты в этой области сложны и дорогостоящи, а часто и вообще невыполнимы, то предлагается использовать методы компьютерного моделирования. С помощью такого подхода возможно не только рассчитать эффективность конкретных методов компенсации турбулентных возмущений, но и проделать это как с учетом дифракционных эффектов, так и в пренебрежении ими.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

1. Исследовать влияние дифракции света на фазовых неоднородностях среды распространения на эффективность работы адаптивных оптических систем в условиях анизопланатизма. Разработать модель, позволяющую для любой заданной реализации неоднородной среды рассчитывать результаты адаптивной коррекции волнового фронта как с учетом дифракции, так и в приближении геометрической оптики.

2. Разработать программный комплекс для численного моделирования адаптивных систем атмосферной оптики, функционирующих в условиях анизопланатизма. Построить компьютерную модель, которая позволяет вычислять

сигналы датчика волнового фронта адаптивной оптической системы, определять вносимую корректором дополнительную фазу и регистрировать изменение во времени абберационных коэффициентов на выходе системы так, как это происходит в адаптивной системе при наблюдении сквозь движущийся турбулентный слой.

3. Применить разработанное программное обеспечение для расчета мгновенных и усредненных значений фазовых ошибок коррекции при различном угловом разнесении опорного источника и области наблюдения в широком диапазоне параметров адаптивной системы и атмосферных неоднородностей. Рассчитать мгновенные и усредненные характеристики системы: функцию рассеяния точки (ФРТ) и оптическую передаточную функцию (ОПФ), а также оценить угловой размер области изопланатизма и зависимости числа Штреля SR от углового разнесения источников при различном числе корректируемых мод Цернике.

4. Рассчитать флуктуации остаточной квадратичной ошибки коррекции и временные флуктуации, возникающие при сносе турбулентного слоя поперечным ветром с заданной скоростью при различных вариантах алгоритма коррекции.

5. Провести расчеты остаточных ошибок адаптивной коррекции как с учетом дифракции на неоднородностях атмосферы, так и в приближении геометрической оптики и оценить роль дифракционных эффектов.

**Научная новизна** полученных результатов диссертационной работы заключается в том, что впервые:

1. Рассчитаны остаточные ошибки коррекции атмосферных aberrаций в адаптивной оптической системе в условиях анизопланатизма с учетом дифракции на фазовых неоднородностях среды распространения.
2. Разработан программный комплекс для численного моделирования работы адаптивной системы в атмосфере с учетом дифракционных эффектов.
3. Проведены расчеты мгновенных и усредненных характеристик оптической системы с адаптивной коррекцией определенного числа мод Цернике в

зависимости от величины углового расстояния между наблюдаемым объектом и опорным источником как с учетом дифракции, так и без него, и проведено сравнение полученных результатов.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что разработанные комплекс программ и численная модель позволяют оперативно рассчитывать характеристики адаптивных оптических систем, работающих в условиях анизопланатизма, с учетом ряда факторов, существенно определяющих эффективность адаптивной коррекции: дифракции световых пучков на фазовых неоднородностях атмосферы, числа корректируемых мод, устройства датчика волнового фронта, алгоритма управления корректором. Такого рода расчеты позволяют оптимизировать структуру и параметры адаптивных систем.

### **Защищаемые положения**

1. Дифракция световых пучков на фазовых неоднородностях атмосферы и возникающие в этой связи флуктуации амплитуды вносят существенные поправки в оценки остаточных ошибок адаптивной системы при анизопланатизме. Так, в случае длинной трассы ( $L = 10000$  м) и слабой турбулентности ( $C_n^2 = 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ ) учет дифракции приводит к уменьшению среднего квадрата ошибки коррекции примерно в 2 раза при малых углах (1-5 мкрад) между направлениями на источники и в 1.3 раза при больших углах (20 мкрад).
2. Модель позволяет выделить и исследовать по отдельности ошибки коррекции, вызываемые различными причинами: собственно анизопланатизмом системы, флуктуациями амплитуды регистрируемых волн и погрешностями датчика волнового фронта. Такое исследование позволяет лучше понять влияние различных факторов, ограничивающих эффективность адаптивной коррекции.

3. Компьютерное моделирование является эффективным методом исследования функционирования адаптивных оптических систем в условиях анизопланатизма.

### **Апробация работы**

Основные результаты изложены в 6 публикациях, из них 2 статьи в реферируемых журналах и 1 препринт. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях: “11<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Oceanic Optics” (Tomsk, 2004), “13<sup>th</sup> Multi-Disciplinary Iranian Researchers Conference in Europe” (Leeds, UK, 2005), “20<sup>th</sup> Congress of the International Commission for Optics” (Changchun, China, 2005).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Работа изложена на 114 страницах и включает 31 рисунок. Список литературы содержит 61 наименование, включая 6 публикаций автора по теме диссертации.

### **Личный вклад**

Все приведенные в диссертации результаты получены при непосредственном участии автора. Составление программ и проведение расчетов выполнено автором лично.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во ВВЕДЕНИИ** дается общая характеристика работы, обсуждается ее актуальность, формулируются цели работы и защищаемые положения, приводится структура и объем диссертации.

**ПЕРВАЯ ГЛАВА** посвящена обсуждению проблемы анизопланатизма оптических адаптивных систем, формулировке требований, которые должен учитывать метод исследования, обсуждению целесообразности применения методов компьютерного моделирования при исследовании анизопланатизма в атмосферной

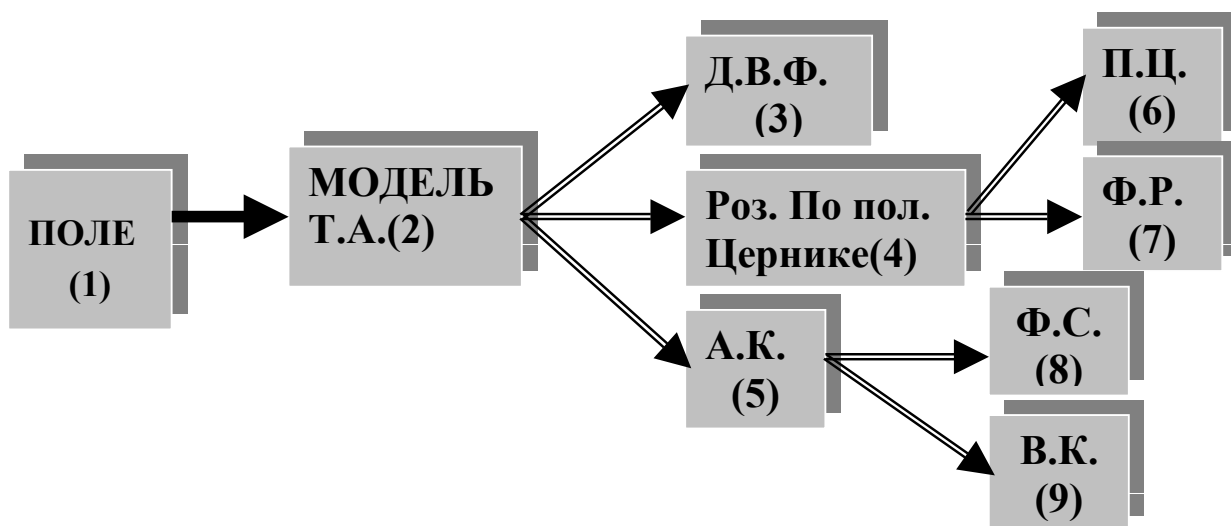
оптике. Проводится обзор методов, часто применяемых для анализа эффективности адаптивных систем в условиях турбулентной атмосферы. Обсуждаются методы расчета переноса изображений и возможность их использования в условиях анизопланатизма. Приводятся некоторые важные результаты, полученные ранее. На основании изложенного в этой главе материала делается вывод: подавляющее большинство проведенных к настоящему времени исследований анизопланатизма адаптивных систем выполнено без учета дифракционных явлений в атмосфере, что далеко не всегда оправдано. Область применимости такого приближения также не всегда ясна. Метод численного моделирования позволяет, в значительной мере, преодолеть эти ограничения. В **параграфе 1.1** сформулирована основная цель работы. В **параграфе 1.2** рассмотрены предположения о внешних условиях и общем характере моделируемой задачи. **Параграф 1.3** посвящен учету распределения неоднородностей по высоте. **Параграф 1.4** посвящен оценкам угла изопланатизма. В **параграфе 1.5** рассмотрена эффективность адаптивной компенсации в условиях анизопланатизма. В **параграфе 1.6** рассмотрены временные флуктуации регистрируемой в системе фазы, которые обусловлены, в первую очередь, сносом турбулентности поперечным ветром. В **параграфе 1.7** обсуждается моделирование распространения световых пучков через турбулентную атмосферу с помощью метода фазовых экранов. **Параграф 1.8** посвящен характеристикам изображения точечного объекта.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** обсуждается метод моделирования адаптивной оптической системы в условиях анизопланатизма. В **параграфе 2.1** рассмотрено моделирование распространения светового пучка в атмосфере методом фазовых экранов с учетом дифракции. В **параграфе 2.2** обсуждаются приемы анализа искажений волнового фронта. В **параграфе 2.3** рассмотрена фазовая коррекция в условиях анизопланатизма с использованием двух простейших алгоритмов. На основании изложенного в этой главе делается заключение о перспективности применения модельных методов к анализу эффективности адаптивной коррекции в условиях анизопланатизма: метод



моделирования позволяет учесть конкретные особенности применяемого датчика волнового фронта, учесть влияние флуктуаций амплитуды на точность его работы; учитывает алгоритм фазовой коррекции и его влияние на величину остаточной ошибки; позволяет вычислить мгновенные ошибки коррекции, соответствующие некоторому «замороженному» состоянию атмосферы и соответствующие характеристики оптической системы – функцию рассеяния точки и оптическую передаточную функцию.

**ТРЕТЬЯ ГЛАВА** посвящена численному моделированию адаптивной оптической системы. В **параграфе 3.1** обсуждается структура и состав модели. Программа включает следующие блоки: а) моделирования распространения световой волны в турбулентной атмосфере, б) моделирования работы гартмановского датчика, восстанавливающего профиль фазы волны от опорного источника, в) коррекция фазы волны от наблюдаемого объекта, г) вычисления и обработки остаточных ошибок. В **параграфе 3.2** рассмотрены схема и параметры модели. Блок-схема модели приведена на рис. 1.



*Рис.1.*

При расчетах все поперечные размеры нормированы на размер ячейки  $a$  (принималось  $a=1\text{см}$ ), а продольные – на соответствующую дифракционную длину  $L_d = ka^2 = 1256 \text{ м}$ . Как следует из принятой размерности экранов и числа узлов (256)

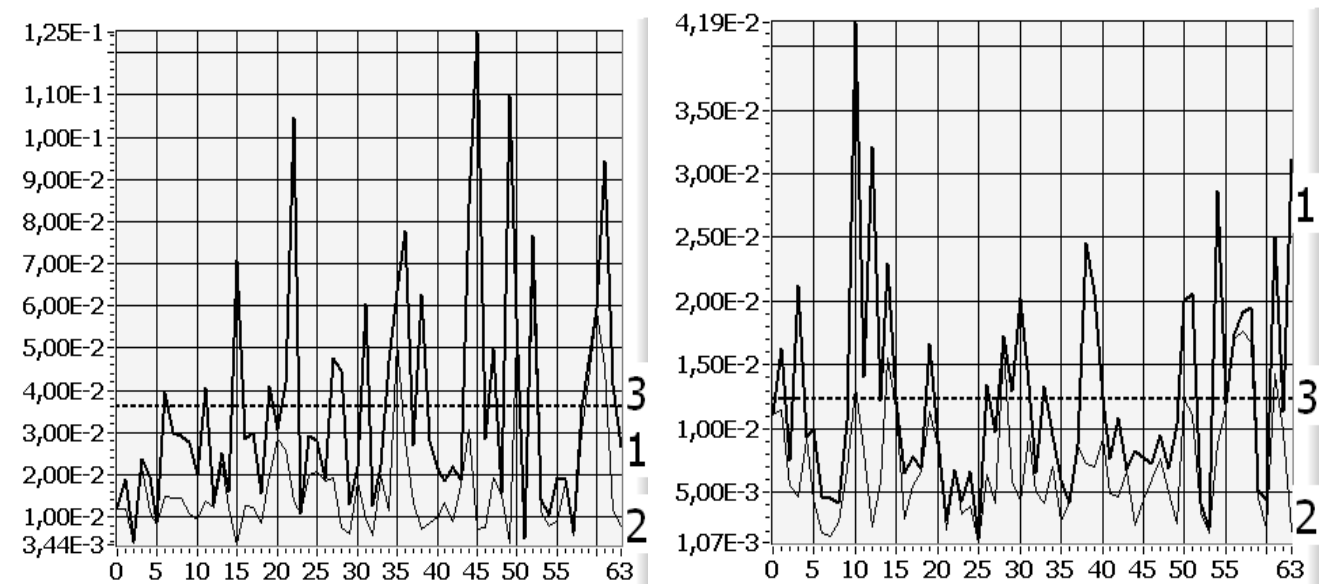
максимальное отношение изображаемых на сетке масштабов неоднородностей не может превышать 256. В реальной атмосфере это отношение намного больше: отношение внешнего масштаба  $L$  к внутреннему  $l$ ,  $L/l \approx 10^5$  и более. Таким образом, наша модель не описывает все реальные масштабы турбулентных возмущений.

Формируемое в блоке (1) входное поле попадает в блок (2), моделирующий распространение световых волн в турбулентной атмосфере. Задача распространения решалась методом фазовых экранов. При расчетах использовались четыре экрана. На распределение комплексной амплитуды на входе накладывалась супергауссова амплитудная маска для подавления краевых эффектов. Область полезной апертуры диаметром в 64 ячейки располагалась в центре маски, в области слабой модуляции амплитуды. Фаза поля на выходе блока распространения (2) представлялась в блоке (4) виде разложения по 27 полиномам Цернике. Разложение фазы выходного поля могло быть выполнено по одному из двух алгоритмов, реализованных в блоках (6) и (7). В первом варианте (блок П.Ц.) коэффициенты aberrаций вычислялись прямым интегрированием по апертуре с функциями Цернике фазы волны, определенной как  $\arg(u)$ , где  $u$  - вычисленная комплексная амплитуда поля. Недостаток такого метода состоит в том, что при изменениях фазы, превышающих  $\pi$ , возникает «нарезка» фазы, и алгоритм работает неправильно. Поэтому вычисленные таким образом коэффициенты aberrаций могли использоваться лишь при заведомо малых фазовых искажениях. При сильных искажениях волнового фронта применялся другой алгоритм – «реконструкция» фазы, Р.Ф., реализованный в блоке (7). При использовании этого алгоритма сначала вычислялись приращения фазы между двумя соседними узлами сетки, которые всегда были достаточно малы и вычислялись правильно. Затем по измеренным разностям фаз восстанавливались по известной методике наименьших квадратов коэффициенты разложения Цернике. Коэффициенты этого разложения интерпретировались как «истинные» значения aberrаций. Кроме того, распределение комплексного поля с выхода блока (2) поступало на вход блока (3), моделирующего процедуру вычисления aberrаций в датчике волнового фронта. Полученные таким путем величины рассматривались как «измеренные» aberrации. Последние включали

ошибки измерения, связанные с конечным числом субапертур датчика (52), их конечным размером (8×8 ячеек сетки) и влиянием амплитудных флуктуаций на входе датчика. При выполнении расчетов в приближении геометрической оптики эти флуктуации отсутствовали. В контрольных расчетах на входе системы задавалось поле с плавно изменяющейся фазой, описываемой не более чем 10 первыми полиномами Цернике. В этом случае, при отсутствии флуктуаций, заданные на входе, «истинные» на выходе и «измеренные» значения коэффициентов Цернике практически совпадали. В случае фазовых экранов, моделирующих атмосферу, ошибки измерений заметны, и существенно влияют на результаты моделирования адаптивной системы. В блоке коррекции волнового фронта (5) по измеренным коэффициентам Цернике волны опорного источника и «истинным» коэффициентам объектной волны вычислялись коэффициенты аберраций остаточной ошибки по формулам (7) (блок 8) или (8) (блок 9) в зависимости от рассматриваемого алгоритма коррекции.

**В параграфе 3.3** приведены результаты моделирования.

На рисунке 2 (а и б) показаны текущие значения квадратичных ошибок коррекции при «протягивании» фазовых экранов поперек трассы распространения.



(а) Рис. 2. (б)

**Изменение ошибок коррекции во времени при перемещении фазовых экранов.**

**а) без дифракции , б) с дифракцией. ( $\theta=1\mu\text{r}$  и  $D/r_0=1$ ).**

На этом рисунке кривая 1 - суммарная ошибка всех (27) мод, а 2 - то же, за вычетом наклонов. Линия 3 соответствует среднему квадрату ошибки.

Как видно из приведенных графиков, остаточные ошибки в адаптивной системе при учете дифракции уменьшаются (б). Это связано с тем, что фазовые неоднородности за счет дифракции сглаживаются и становятся более плавными. На этих и последующих рисунках приняты следующие обозначения для квадратичных ошибок коррекции отдельных мод, которые были получены усреднением по 64 различным реализациям фазовых экранов:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{128} \sum_{k=1}^{64} (a_i'^2 + a_i^2) \quad (1)$$

$$\varepsilon_i^2 = \frac{1}{64} \sum_{k=1}^{64} (a_i' - a_i)^2 \quad (2)$$

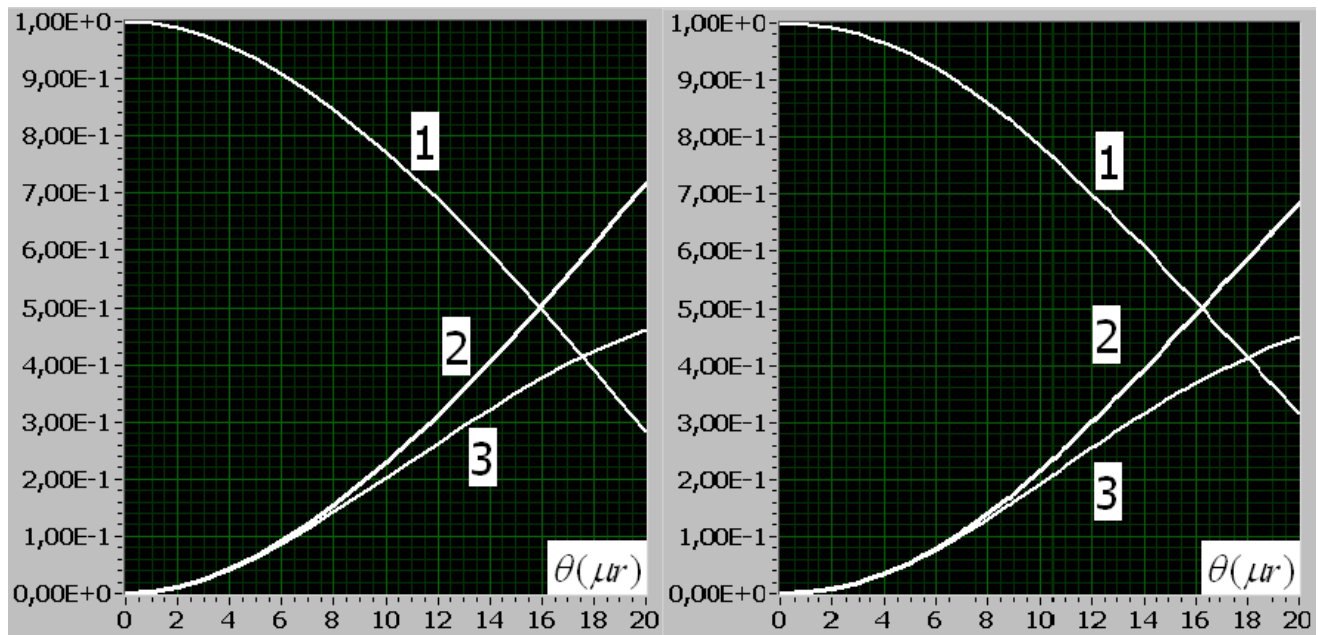
В этих формулах  $a_i$  и  $a_i'$  – коэффициенты Цернике опорной и предметной волн соответственно,  $i$  – номер моды,  $k$  – номер реализации экранов. Для алгоритма взвешенной коррекции вычислялась величина

$$\tilde{\varepsilon}_i^2 = \frac{1}{64} \sum_{k=1}^{64} (a_i' - K_i(\theta)a_i)^2 \quad (3)$$

На рис. 3 показаны рассчитанные для одной из мод Цернике (дефокус) квадратичные ошибки коррекции при двух упоминавшихся ранее алгоритмах, нормированные на ошибку в системе без коррекции  $\varepsilon_{0i}^2 = \frac{\varepsilon_i^2}{\sigma_i^2}$  (кривая 2), и  $\tilde{\varepsilon}_{0i}^2 = \frac{\tilde{\varepsilon}_i^2}{\sigma_i^2}$  (кривая 3). Коэффициент корреляции между этими модами в двух пучках в зависимости от угла между пучками представлен графиком 1.

Расчеты проведены как в приближении геометрической оптики (а), так и с учетом дифракции (б). Как можно заключить из этих графиков, нормированные ошибки мало

изменяются при учете дифракции, хотя снижение ошибок можно заметить и в этом случае.



(а)

Рис.3.

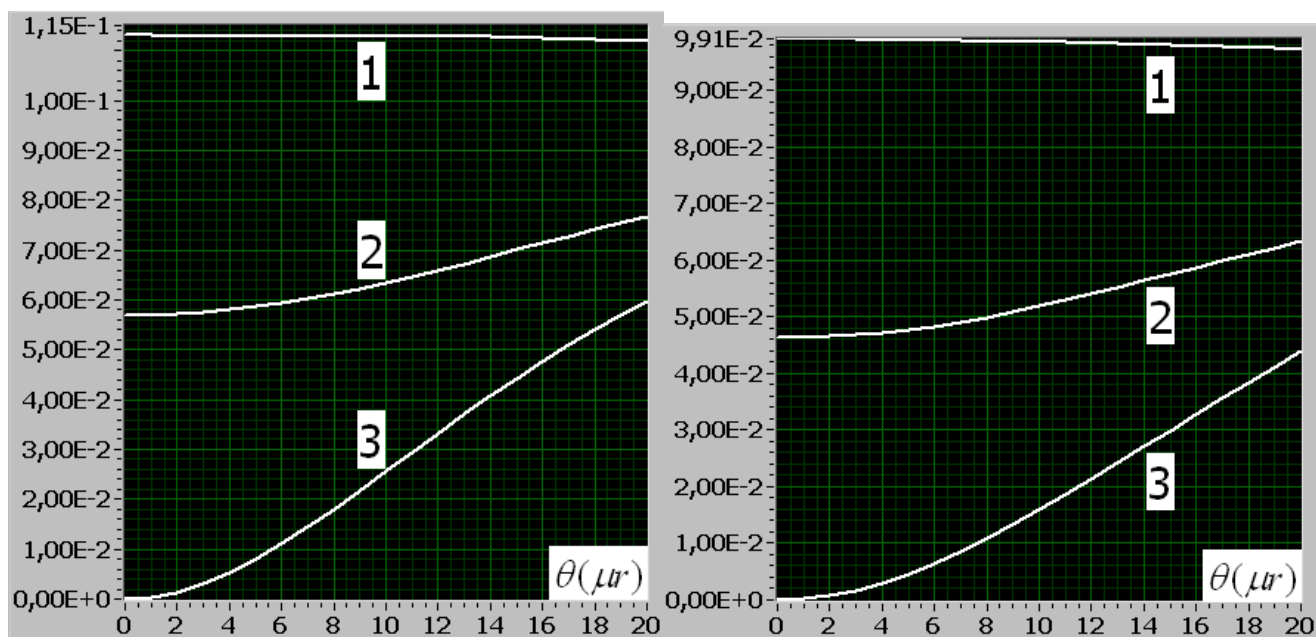
(б)

*Коэффициент корреляции  $K_i(\theta)$  и нормированные ошибки коррекции ( $D/r_0=1$ ), а) без дифракции, б) с дифракцией.*

На рис 4 приведены зависимости от параметра  $\theta$  квадратичных ошибок в системе без коррекции  $\sigma_0^2 = \sum_{i=3}^{27} \sigma_i^2$  (кривая 1), с полной коррекцией 27 мод Цернике

$$\varepsilon_{27}^2 = \sum_{i=3}^{27} \varepsilon_i^2 \quad (2) \text{ и с коррекцией aberrаций только второго порядка } \varepsilon_5^2 = \sum_{i=3}^5 \varepsilon_i^2 + \sum_{i=6}^{27} \sigma_i^2 \quad (3).$$

Как видно из графиков, при коррекции только низших aberrаций остаточная ошибка при  $\theta = 0$  имеет значительно большее значение, чем при полной коррекции, однако возрастает медленнее с ростом угла между пучками. Поэтому при больших углах между опорным и предметным объектами коррекция меньшего числа мод может оказаться эффективнее полной коррекции.



(a)

Рис.4.

(б)

*Квадратичная ошибка, наклоны исключены. а) без дифракции, б) с дифракцией ( $D/r_0=1$ ).*

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

Проведенный анализ остаточных ошибок адаптивной оптической системы, функционирующей в условиях анизопланатизма, хотя и не охватывает всех возможных ситуаций, позволяет сделать, тем не менее, ряд общих выводов.

1. Дифракционные эффекты оказывают существенное влияние на работу адаптивных систем с анизопланатизмом и должны учитываться при расчетах эффективности фазовой коррекции в таких системах. При этом влияние дифракции носит двоякий характер: с одной стороны, дифракция сглаживает фазовые неоднородности, что ведет к уменьшению остаточных ошибок, с другой - порождает амплитудные флуктуации, снижающие точность работы датчиков волнового фронта и увеличивающие, в конечном счете, ошибки компенсации. В рассмотренных в диссертации ситуациях (большая длина трассы при слабой турбулентности) первый

эффект был преобладающим. С увеличением угла между пучками снижение ошибок при учете дифракции уменьшается.

2. Численное моделирование предоставляет уникальную возможность исследовать по отдельности вклады различных факторов в формирование остаточной ошибки. Так, возможность «включить» и «выключить» дифракцию не изменяя реализацию фазовых неоднородностей позволяет просто и наглядно оценить роль дифракционных явлений.

3. Численное моделирование позволяет определить характеристики системы, интересные с точки зрения ее использования в прикладных задачах - функцию рассеяния точки, оптическую передаточную функцию, число Штреля и др. Все эти характеристики могут вычисляться как для случая «замороженной» турбулентности, так и усредненные по некоторому интервалу наблюдения при сносе турбулентности поперечным ветром.

4. В модели можно легко реализовать различные алгоритмы управления фазовым корректором и оценить их эффективность.

Таким образом, метод моделирования является достаточно гибким и универсальным средством исследования работы адаптивных оптических систем в условиях анизопланатизма.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *А.В. Корябин, М. Моради, В.И. Шмальгаузен.* Модель адаптивной оптической системы в турбулентной атмосфере// Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия, 2004, № 6, с. 61-63.
2. *А.В. Корябин, М. Моради, В.И. Шмальгаузен.* Моделирование анизопланатизма адаптивной оптической системы в турбулентной атмосфере// Оптика атмосферы и океана, 2005, 18, № 10, с. 863 - 867.
3. *А.В. Корябин, М. Моради, В.И. Шмальгаузен.* Моделирование анизопланатизма адаптивной оптической системы в турбулентной атмосфере// Препринт физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005, № 17/2005, с. 25.
4. *М. Moradi, A.V. Koryabin, V. I. Shmalhausen.* Simulation of Adaptive Optics System Anisoplanatism in Inhomogeneous Inhomogeneous Atmosphere// in “XI Joint International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics (Tomsk, Russia)”, book of Abstracts, 2004, p.82.
5. *М. Moradi, A.V. Koryabin, V. I. Shmalhausen.* Simulation of Anisoplanatism of an Adaptive Optical System in the Turbulent Atmosphere// in “13<sup>th</sup> Multi-Disciplinary Iranian Researchers Conference in Europe (Leeds, UK)”, book of Abstracts, 2005, p.14.
6. *М. Moradi, A.V. Koryabin, V. I. Shmalhausen.* Simulation of Anisoplanatism of Adaptive Optical System in Inhomogeneous Turbulent Atmosphere// in “20<sup>th</sup> Congress of the International Commission for Optics (Changchun, China)”, Technical Digest, 2005, pp.54-55.