


Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

на правах рукописи
УДК 520.823/520.16/520.2.07



Сафонов Борис Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ
УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ 2.5 М ТЕЛЕСКОПА ПО
ДАНЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА МЕСТЕ ЕГО УСТАНОВКИ**

Специальность: *01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,
доцент Корнилов Виктор Геральдович
(Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова)

Официальные оппоненты Балега Юрий Юрьевич
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
(Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН)

Наджип Ауренгзед Эмирович
кандидат физико-математических наук
(Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова)

Ведущая организация Харьковский национальный университет, Украина

Защита состоится **21 февраля 2013 года в 14⁰⁰** на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга МГУ по адресу 119992, г. Москва, Университетский пр-т, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан **18 января 2013 г.**

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Алексеев С.О.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Угловое разрешение оптических телескопов оказывает решающее влияние на два аспекта наблюдений: возможность изучения по отдельности тесно расположенных объектов, а также обнаружения и измерения слабых точечных источников. На протяжении всей истории наблюдений, а особенно в последние десятилетия, увеличение углового разрешения приводило к получению совершенно новых, часто непредвиденных астрономических результатов.

Для наземных оптических телескопов задача повышения углового разрешения связана в первую очередь с преодолением искажений изображения, возникающих при распространении света через земную атмосферу. Для этого было разработано множество методов, доводящих угловое разрешение вплоть до дифракционного. С помощью этих методов интересные результаты были получены и на телескопах, сопоставимых по размеру с будущим 2.5 м телескопом ГАИШ (далее 2.5 м телескоп) [1, 2, 3]. Простые оценки показывают, что даже при таком диаметре апертуры выигрыш по разрешению может составить 15 – 30 раз. Дополнительным подтверждением является то, что сейчас активно развиваются около десятка проектов, в которых использование дифракционного разрешения 2-4 м телескопов позволит получить принципиально новые астрономические данные [4, 5, 6].

Методы увеличения углового разрешения можно условно разделить на пассивные и активные. Первые основаны на анализе искаженных изображений *post-factum*, вторые же предполагают исправление флуктуаций волнового фронта в реальном времени. Применение активных методов, известных под общим названием адаптивная оптика (АО), оказалось наиболее плодотворным, и их влияние на развитие наблюдательной астрономии очень велико. Однако, использование пассивных методов увеличения разрешения, таких как спекл-интерферометрия и селекция изображений, при решении ряда задач более предпочтительно. Эти методы намного проще в реализации, поэтому целесообразно рассматривать как активные, так и пассивные методы увеличения разрешения 2.5 м телескопа.

Цели работы — исследовать эффективность различных пассивных и активных методов увеличения углового разрешения применительно к 2.5 м телескопу на основе измерений ОТ на горе Шатджатмаз для последующей разработки приборов и их применения при решении наблюдательных задач.

Реализация этих методов, как правило, связана с созданием довольно слож-

ных приборов, эффективность которых определяется множеством факторов — их конструкцией, параметрами телескопа, характеристиками атмосферной оптической турбулентности (ОТ), свойствами излучения источника. Часто не существует простого способа предсказать эффективность системы при данных обстоятельствах, в этих случаях применяют численное моделирование всего процесса распространения света в атмосфере, телескопе, приборе, а также формирования и регистрации соответствующего изображения.

В связи с этим были поставлены следующие задачи. Построить на основе данных MASS-DIMM (Multiaperture Scintillation Sensor — Differential Image Motion Monitor [7]), полученных в 2007-2011 годах [8, 9, 10], модель ОТ в атмосфере над вершиной Шатджатмаз, пригодную для использования в численном моделировании. С помощью этой модели рассмотреть следующие методы увеличения углового разрешения: адаптивная оптика с естественной опорной звездой, адаптивная оптика с искусственной опорной звездой, компенсация наклонов волнового фронта, селекция изображений, дифференциальная спекл-поляриметрия.

Для каждого метода: 1) Рассмотреть случай, когда наблюдаемый объект может использоваться как опорная звезда, и оценить для него оптимальные значения основных параметров прибора, а также сравнить разные варианты его реализации и определить наиболее эффективный из них. Оценить его эффективность в смысле распределений параметров восстановленного изображения. 2) Рассмотреть случай, когда опорный источник находится на расстоянии от объекта и оценить эффективность прибора исходя из вероятности найти подходящий опорный источник. 3) Оценить поле зрения — т.е. размер области вокруг опорной звезды, где коррекция осуществляется на приемлемом уровне.

Научная новизна. Несмотря на то, что на Кавказе расположено несколько обсерваторий, регулярные измерения ОТ в этом регионе ранее не проводились. Используемые нами для моделирования данные были получены впервые в рамках астроклиматического исследования места установки 2.5 м телескопа. Отметим, что измерения были выполнены с инструментом MASS-DIMM, идентичным применяемым при выборе места для сверхкрупных телескопов и для сопровождения систем АО на ведущих обсерваториях мира.

Впервые построены модели турбулентности для пункта на Северном Кавказе. При обработке измерений MASS-DIMM была применена новая методика [11], позволившая получать одновременно с вертикальным профилем ОТ и профиль

ветра. Это позволило расширить стандартную процедуру построения модели ОТ, добавив к рассмотрению переменность профиля ветра.

Впервые с помощью моделирования показано, что система АО с естественной опорной звездой, работающая в видимом диапазоне на 2.5 м телескопе, при оптимизации конструкции может обеспечить уменьшение полуширины изображения при наблюдении в произвольном направлении в среднем в 1.6 раз.

Особенно интересным типом АО является адаптивная оптика с компенсацией приземного слоя (GLAO), она обеспечивает уменьшение размеров изображения в 2-3 раза в поле $> 3'$, что особенно ценно для телескопов диаметром 2-4 м. Ранее возможности GLAO исследовались при реализации на телескопах в Чили, на Мауна Кеа и в Антарктиде. Мы с помощью моделирования показали, что применение GLAO весьма перспективно и в условиях Северного Кавказа.

В последнее время все большее внимание уделяется поляризационным наблюдениям астрономических объектов. Например, использование поляризации значительно упрощает обнаружение слабых источников вблизи ярких звезд, т.к. эти источники светят за счет рассеяния излучения центральной звезды. Однако применяемые на данный момент методы требуют сложных систем АО и не менее сложных коронографов. В диссертации рассматривается намного более простой пассивный метод получения информации о распределении поляризованного потока с дифракционным разрешением, а также предлагается алгоритм обработки и калибровочные процедуры. Показано, что этот метод позволит решать интересные астрофизические задачи на 2.5 м телескопе.

Положения, выносимые на защиту

1. Построены две модели типичной оптической турбулентности (ОТ) и скорости ветра на основе измерений с прибором MASS-DIMM в 2007-2011 гг на месте установки 2.5 м телескопа. Для сравнения также построена модель типичных профилей для Майданакской обсерватории.
2. На основе моделей типичной ОТ для 2.5 м телескопа выполнено моделирование адаптивной оптики (АО) с естественной и искусственной опорной звездой. В первом случае при размере субапертуры 35 см коррекция волнового фронта дает близкое к дифракционному разрешение для опорной звезды. При наблюдении в произвольном направлении на небе медианы полуширин скорректированных изображений составляют $0.37''$ и $0.27''$ в фото-

метрических полосах R и I , соответственно. Во втором случае при размере субапертуры 22.5 см и высоте фокусировки лазера 8 км медианы распределений полуширины скорректированных изображений равны $0.28''$ и $0.26''$ в полосах R и I , соответственно. Медиана распределения размера поля зрения системы составляет $2.5'$ в полосе I .

3. Показано, что в ближнем ИК-диапазоне для достижения дифракционного разрешения достаточно компенсации наклонов волнового фронта. При использовании двух гидировочных звезд доля наблюдательного времени на 2.5 м телескопе, когда скорректированное изображение в центре поля $< 0.3''$, составит 40% и 70% для полос H и K , соответственно. В видимом диапазоне рассмотрена компенсация наклонов постфактум, методом селекции изображений. Показано, что при медианных условиях на 2.5 м телескопе оптимальный масштаб ПЗС камеры составляет $0.066''/\text{пкс}$. При этом с детектором формата 512×512 пкс обеспечивается поле зрения $34''$ и изображения с полушириной $< 0.1''$ по всему полю.
4. Показано, что на 2.5 м телескопе весьма перспективно применение метода дифференциальной спекл-поляриметрии для получения информации о распределении поляризованного излучения от астрономических объектов (например, околозвездного окружения) с дифракционным разрешением.

Научная и практическая значимость. АО — сложная система, и практически единственным способом заранее оценить ее возможности в зависимости от конструкции и внешних условий является численное моделирование, чему и посвящена значительная часть этой работы. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании системы АО и быстрой камеры высокого разрешения для 2.5 м телескопа. Модель АО, использованная в работе, позволяет достаточно быстро оценивать достижимые параметры изображения для данного профиля ОТ и ветра, для данного инструмента и телескопа. С практической точки зрения это означает, что ее можно использовать для 1) оценки доли времени, в которую данная астрофизическая задача выполнима на данном телескопе, а также среднее время ожидания таких условий; 2) оценки выполнимости данной астрофизической задачи на данном телескопе в данный момент времени (используя текущие данные об ОТ), что необходимо для оперативного планирования.

АО способствует увеличению эффективности практически всех видов наблюдений: фотометрия, спектроскопия, получение изображений. Она позволит ре-

шать как существующие задачи за более короткое время, так и задачи, вообще невыполнимые с данным телескопом без АО, поэтому ее реализация на 2.5 м телескопе чрезвычайно актуальна.

Метод селекции изображений может быть применен для оценки параметров визуальных двойных звезд с разделением $< 1''$. Также интересной задачей является фотометрия в тесном поле, например, скоплений или в галактическом балдже.

Метод дифференциальной спекл-поляриметрии (ДСП), рассматриваемый в работе, представляется весьма перспективным при реализации на 2.5 м телескопе. Метод имеет свою нишу в ряду похожих методов получения информации о распределении поляризованного потока в изображении объекта: он позволяет обнаруживать детали низкого контраста на сравнительно малом угловом расстоянии от яркой звезды в *видимом* диапазоне. Он имеет большой потенциал при работе в режиме сверхразрешения. Вот лишь некоторые примеры объектов, для изучения которых ДСП может оказаться полезен: 1) Внутренняя часть кометной комы, регистрация поляризованных деталей на расстоянии 10-20 км от ядра кометы. 2) Газопылевые оболочки около звезд. 3) Активные ядра галактик, изменение положения фотоцентра поляризованного излучения. На более крупных телескопах применение ДСП еще более перспективно.

Модель атмосферы для вершины Шатджатмаз может быть использована для моделирования других методов увеличения разрешения, например, мультисопряженной адаптивной оптики, а также для предварительных оценок эффективности методов увеличения углового разрешения при реализации в других обсерваториях Северного Кавказа.

Список печатных работ

1. В. Корнилов, С. Ильясов, О. Возякова, Ю. Тиллаев, Б. Сафонов, М. Ибрагимов, Н. Шатский, Ш. Эгамбердиев, *Измерения оптической турбулентности в свободной атмосфере над горой Майданак в 2005-2007 гг*, **Письма в Астрономический журнал**. – 2009. – Т. 35. – С. 606–614.
2. V. Kornilov, N. Shatsky, O. Voziakova, B. Safonov, S. Potanin, M. Kornilov, *First results of a site-testing programme at Mount Shatdzhathmaz during 2007-2009*, **Monthly Notices of the RAS**. – 2010. – V. 408. – Pp. 1233–1248.
3. Safonov B.S., *Lucky image performance simulation on the basis of optical turbulence data obtained on Mt. Shatdzhathmaz*, **Proceedings of the 17th Young Scientists'**

Conference on Astronomy and Space Physics, – 2011. – Pp. 102–105.

4. Safonov B. S., *Experimental examination of type of tilt measured by DIMM*, **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series.** – V. 41 – 2011. – Pp. 50–53.
5. Kornilov V., Safonov B. *Differential image motion in the short-exposure regime*, **Monthly Notices of the RAS.** – 2011. – V. 418. – Pp. 1878–1888.
6. Safonov B., *Adaptive optics performance simulation on the basis of MASS/DIMM data obtained on Mt. Shatdjatmaz in 2009–2011.* – V. 8443 of **Proc. SPIE** – 2012.
7. Сафонов Б., *Дифференциальная спекл-поляриметрия: теоретический анализ возможностей. Письма в Астрономический Журнал*, принята к публикации 23 октября 2012. ArXiv:1212.6141

Апробация. Результаты работы были представлены на докладах на следующих конференциях:

1. “XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов””. 12-15 апреля 2010, Москва, Россия. Устный доклад: “Модельное исследование возможностей селекции изображений на основе данных об атмосферной турбулентности, полученных на горе Шатджатмаз”.
2. “17-я конференция молодых ученых по астрономии и физике космоса”. 26 апреля – 1 мая 2010 года, Киев, Украина. Устный доклад: “Lucky Image Performance Simulation on the Basis of Optical Turbulence Data Obtained on Shatgatmaz”.
3. Международная конференция “Комплексная оценка мест для астрономических наблюдений”. 4 – 9 октября 2010 года, Кисловодск, Россия, Устный доклад: “Twilight measurements with MASS-DIMM”.
4. Международная конференция “Результаты астроклиматических исследований в Чили”. 1-3 декабря 2010 года, Вальпараисо, Чили. Устный доклад “Experimental examination of type of tilt measured by DIMM”.
5. Международная конференция молодых ученых “50 лет космической эры: реальные и виртуальные исследования неба”, 21-25 ноября 2011, Ереван, Армения. Устный доклад “Дифференциальные дрожания изображений в приближении коротких экспозиций”.

6. Симпозиум “Астрономические телескопы и инструменты 2012”, 1-6 июля 2012, Амстердам, Нидерланды. Стендовый доклад “Adaptive optics performance simulation on the basis of MASS/DIMM data obtained on Mt. Shatdijatmaz in 2009-2011”.

Личный вклад автора. Автор данной работы участвовал в создании автоматизированного астроклиматического поста ГАИШ, с помощью которого были получены данные об ОТ для Шатджатмаза. Он принимал активное участие в обработке и анализе этих данных. Автор участвовал в проведении астроклиматической кампании по измерению профиля ОТ на Майданаке. Помимо этого он, совместно с коллегами из лаборатории новых фотометрических методов ГАИШ, развивал методику наблюдений с прибором MASS-DIMM.

Анализ систем адаптивной оптики с естественной и искусственной опорной звездой, а также системы компенсации наклонов волнового фронта выполнен автором с помощью модифицированного им пакета для моделирования адаптивной оптики (аналитическое моделирование). Автор проанализировал возможности метода селекции изображений и ДСП с помощью написанной им программы, реализующей известный метод моделирования распространения света в турбулентной среде (Монте-Карло). Формализм для теоретического исследования метода ДСП развит автором.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, трех приложений и списка литературы из 122 наименований. Общий объем работы составляет 174 страницы, включая 54 рисунка и 12 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, производится постановка задачи, а также перечислены методы ее решения.

В **главе 1** приводятся используемые в работе методы моделирования распространения света в турбулентной атмосфере, телескопе и приборе. Сначала рассматривается т.н. аналитический метод. Хотя его название не совсем точно отражает суть метода, но оно устоялось в литературе. Этот метод основывается на расчете спектра мощности флуктуаций фазы, остающихся после АО-коррекции, и соответствующей функции рассеяния точки (ФРТ). Приведены выражения 1) для системы, работающей в замкнутой петле обратной связи, 2) для учета эффекта

конуса, 3) описывающие датчики волнового фронта Шака-Гартмана и “пирамида”. Затем приведен алгоритм моделирования методом Монте-Карло, в т.ч. и для расходящихся пучков. Завершается раздел сравнением результатов, получаемых при помощи этих методов.

В главе 2 дается краткое описание данных измерений профилей интенсивности ОТ и скорости ветра, полученных на Шатджатмазе в 2007-2011 гг. Общий объем количество измерений профиля ОТ — ≈ 100000 — слишком велико, чтобы выполнять моделирование для каждого профиля индивидуально. Поэтому мы строим две модели ОТ, сводящие разнообразие наблюдаемых профилей к небольшому числу некоторых репрезентативных профилей. Первая модель состоит из 9 типичных профилей, соответствующих плохим, средним и хорошим условиям в приземном слое и свободной атмосфере. Эта модель будет использоваться в сложных случаях, требующих длительных вычислений. Вторая модель представляет собой случайную неповторную выборку объемом 300 профилей из полного массива. Эта модель позволит оценивать метрики эффективности методов увеличения углового разрешения, например, полуширину, в терминах распределений. На рис. 1 для примера приведены построенные по этим моделям распределения некоторых параметров атмосферной турбулентности. Видно, что случайная выборка описывает исходное распределение лучше, чем модель типичных профилей. Также в этой главе мы строим модель типичных профилей для Майданака по из-

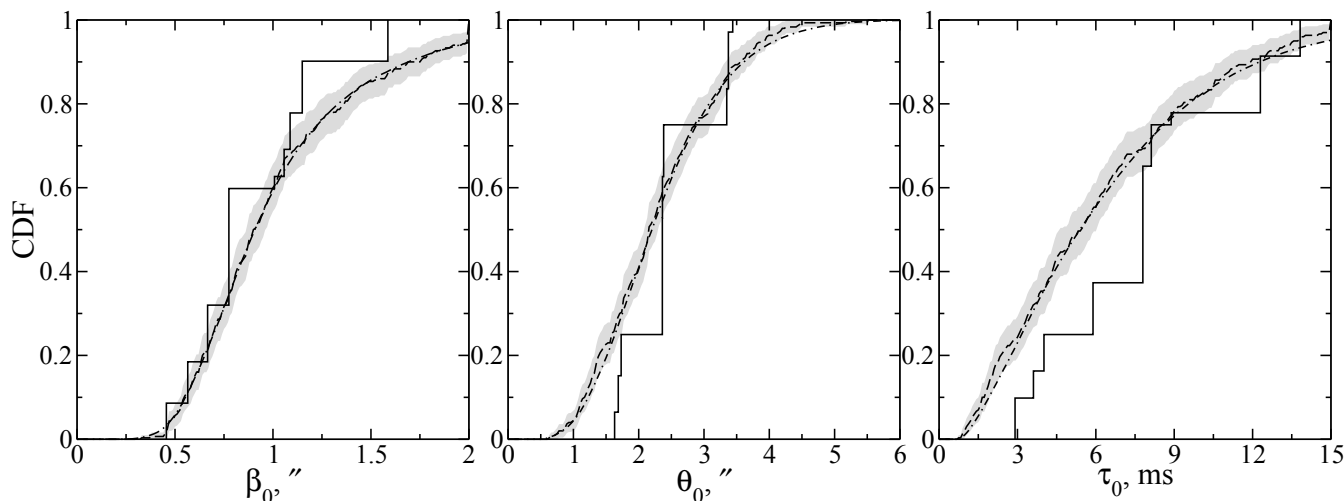


Рис. 1: Распределения качества изображения β_0 , угла изопланатизма θ_0 и атмосферного времени когерентности τ_0 для Шатджатмаза. Штрих-пунктирные линии — распределения, по всем измерениям, сплошные — модель типичных профилей, прерывистые — случайная выборка объемом 300 профилей, серая полоса — 95% доверительный интервал.

мерениям с прибором MASS в 2005-2007 гг. Завершается глава описанием 2.5 м телескопа, в частности ожидаемых собственных аббераций его оптики.

Глава 3 посвящена исследованию системы АО с естественной опорной звездой (NGS АО). Выбираются параметры ФРТ для характеристики эффективности работы системы. В дифракционном режиме адекватной характеристикой изображения является число Штреля, а когда качество коррекции далеко от дифракционного, в режиме частичной коррекции, намного лучше подходит полуширина. Сначала мы рассматриваем эффективность системы в том случае, когда наблюдаемый объект может быть использован как опорная звезда. Мы показываем, что оптимизация времени экспозиции и размера субапертуры под параметры ОТ и яркость опорной звезды значительно увеличивает эффективность системы. Используя модель атмосферы, состоящую из 300 случайных профилей, мы построили ожидаемые распределения полуширины и числа Штреля скорректированного изображения опорной звезды при различном блеске. Из этих распределений видно, что даже для опорной звезды $R = 19^m$ в 45% случаев будет достигаться полуширина менее $0.1''$. Затем мы рассматриваем случай, когда наблюдаемый объект не может быть использован как опорная звезда. Тогда эффективность определяется вероятностью найти опорную звезду достаточно близко к интересующему нас объекту. Она характеризуется также распределением полуширины в произвольном направлении на небе; это распределение заменяет традиционное понятие покрытие неба (см. рис. 2). В конце главы оцениваются распределения поля зрения рассматриваемой системы АО.

В **главе 4** мы моделируем систему АО с искусственной опорной звездой. Отмечается определяющая роль эффектов конуса и клина на ее возможности. Показано, что в видимом диапазоне главным ограничивающим фактором является именно эффект клина. Другими словами, вероятностью найти гидировочную звезду достаточно близко к интересующему нас объекту. Следовательно, применение лазерной опорной звезды, фокусируемой на малой высоте, более предпочтительно, т.к. при этом обеспечивается более однородная коррекция по полю. Такая система будет работать как GLAO. Мы оценили оптимальную высоту фокусировки лазера в 8 км, при частоте импульсов 10 кГц необходимая мощность > 3 Вт, оптимальный размер субапертуры деформируемого зеркала 22.5 см. Показано, что для однородной компенсации наклонов волнового фронта достаточно его измерения по двум опорным звездам. Приводятся оценки эффективности системы в смысле распределений полуширины скорректированного изображения (см. рис.

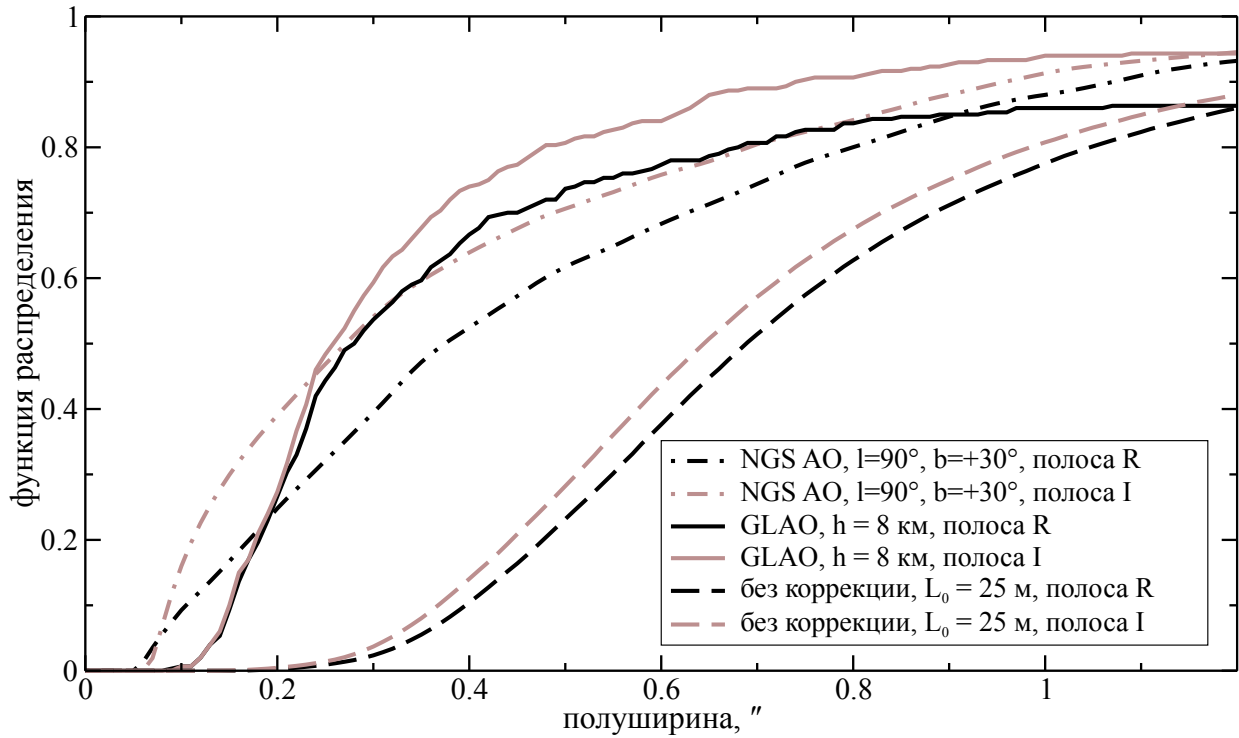


Рис. 2: Сплошные кривые — распределения полуширины компенсированного изображения GLAO, штрих-пунктирные — то же для NGSAO, прерывистые — распределения полуширины некорректированного изображения.

2) и распределения корректируемого поля зрения.

Общий вывод из глав 3 и 4 таков: для наблюдения одиночных точечных объектов ярче 19^m в видимом диапазоне целесообразно использовать систему NGSAO, для наблюдения протяженных объектов или относительно больших полей (размером $\sim 3'$) целесообразно использовать систему GLAO.

В главе 5 мы рассматриваем систему компенсации наклонов волнового фронта для ближнего ИК-диапазона. Точно также, как и для систем АО, мы строим ожидаемые распределения полуширины и числа Штреля изображения гидировочной звезды в полосах J , H и K . Система сможет обеспечить полуширину менее $0.3''$ в 40% и 70% времени для H и K , соответственно. Если сам объект не может служить опорной звездой, то, учитывая, что поле зрения камеры сравнительно велико, для достижения равномерной коррекции желательно использовать две гидировочные звезды. В этом случае доля наблюдательного времени с полушириной менее $0.3''$ по всему полю будет составлять 28%.

В главе 6 мы моделируем метод селекции изображений. Мы показываем, что при медианных условиях в атмосфере достигаемое число Штреля изображения опорной звезды 0.13 при доле отбираемых кадров 5% и размере пикселя $\lambda/2D$. При увеличении размера пикселя вдвое число Штреля уменьшается на 30%, что

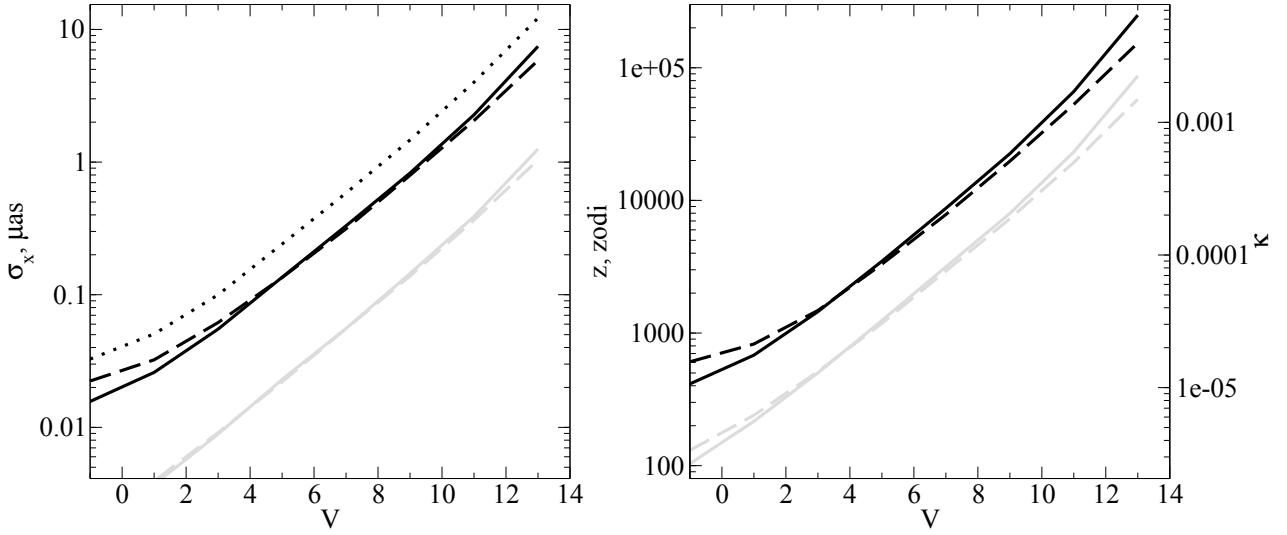


Рис. 3: Ожидаемая точность дифференциальной астрометрии (*слева*) и ожидаемая точность определения параметра z экзозодиакального диска около звезды τ Ceti (*справа*) в зависимости от блеска объекта в полосе V . κ — контраст диска. Сплошные и прерывистые линии обозначают медианные ($r_0 = 12.5$ см) и хорошие ($r_0 = 20.5$ см) условия. Черные линии — 2.5 м телескоп, серые — 6 м телескоп БТА. Пунктирной линией показаны зависимости для полосы I для 2.5 м телескопа в медианных условиях.

вполне приемлемо, если учесть, что поле зрения камеры возрастает в два раза. Полуширина в обоих случаях составляет $0.07''$, т.е. она такая же, как у дифракционного изображения. По мере удаления от опорной звезды полуширина будет возрастать, на расстоянии $22''$ она превышает $0.3''$. При использовании подходящего для селекции изображений детектора iXon+897, с форматом 512×512 пикселей, целесообразно применять масштаб $0.07''/\text{пкс}$, обеспечивающий поле зрения $34''$. В этом случае будет достигаться приемлемое число Штреля (0.1) и будет использоваться почти вся корректируемая область неба.

Глава 7 посвящена теоретическому анализу эффективности метода ДСП. Этот метод основывается на оценке усредненного кросс-спектра \mathcal{R} короткоэкспозиционных изображений, соответствующих горизонтальной и вертикальной поляризации. Мы показываем, что эта величина является смещенной оценкой отношения Фурье-спектров изображений, соответствующих разным направлениям поляризации. Однако это смещение зависит только от свойств оптики телескопа и может быть откалибровано по яркой звезде. Также мы анализируем шум наблюдаемой величины \mathcal{R} , при этом мы учитываем инструментальную поляризацию телескопа, атмосферный и пуассоновский шум. Мы показываем, что для объек-

тов слабее $V \approx 1^m$ пуассоновский шум доминирует над остаточным атмосферным шумом.

Затем мы исследуем эффективность ДСП в применении к трем типичным моделям астрономического объекта: 1) яркий точечный источник и слабое поляризованное окружение произвольного вида 2) яркий точечный источник и слабое поляризованное окружение, описываемое несколькими параметрами 3) объект малых угловых размеров, положение фотоцентра которого зависит от направления пропускаемой поляризации. За экспозицию в 1 час в этом случае достигается контраст по поляризованному потоку 4×10^{-6} на 2.5 м телескопе и 1.6×10^{-6} на 6 м телескопе для звезды $V = 1^m$. Во втором случае на 2.5 м и 6 м телескопах возможно обнаружение дисков, *полный* поток от которых составляет 1.8×10^{-5} и 5.6×10^{-6} потока от центральной звезды $V = 1^m$, соответственно (см. рис. 3). В третьем случае положение фотоцентра поляризованного потока может быть измерено с точностью 8 и 1.2 микросекунд дуги для 2.5 м и 6 м телескопов, соответственно, при блеске $V = 13^m$ (см. рис. 3). Метод ДСП имеет свою нишу — сравнительно высокий контраст в видимом диапазоне на малых угловых расстояниях от звезды и высокая точность дифференциальной астрометрии, — а его реализация на 2.5 м телескопе весьма перспективна.

В **заключении** приводятся основные результаты работы, обобщающие выводы, практические предложения и благодарности.

В **приложениях** мы получаем вспомогательные результаты, используемые в разделе 7. В приложении А мы получаем выражения для распределения параметров Стокса в фокальной плоскости с учетом вариаций инструментальной поляризации по зрачку телескопа. В приложении В приведен расчет среднего смещения \mathcal{R} , а в приложении С — оценку дисперсии величины \mathcal{R} .

Список литературы

- [1] Mawet, D., Serabyn, E., Liewer, K., et al., *Astrophysical Journal* v. 709, p. 53 (Jan. 2010).
- [2] Baranec, C., Riddle, R., Ramaprakash, et al. *Proc. of the SPIE* 8447 (2012).
- [3] Janson, M., Hormuth, F., Bergfors, et al., *Astrophysical Journal* v. 754, p. 44 (2012).

- [4] Dominik, M., Jorgensen, U. G., Hessman, et al., AAS/Division for Extreme Solar Systems Abstracts v. 2, p. 2101 (2011).
- [5] Sanchez-Lavega, A., Rojas, J., Hueso, R., et al., AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts v. 44, p. 215.18 (2012).
- [6] Rodenhuis, M., Canovas, H., Jeffers, S. V., et al, Proc. of the SPIE 8446 (2012).
- [7] Kornilov, V., Tokovinin, A., Shatsky, N., et al. Monthly Notices of the RAS v. 382, p. 1268 (2007).
- [8] Kornilov, V., Shatsky, N., Voziakova, O., et al. Monthly Notices of the RAS v. 408, p. 1233 (2010).
- [9] Safonov, B. S., Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series v. 41, p. 50 (2011).
- [10] Kornilov, V. and Safonov, B., Monthly Notices of the RAS v. 418, p. 1878 (2011).
- [11] Kornilov, M. V., Proc. of the SPIE 8447 (2012).