

*На правах рукописи*

ТАВРОВ Александр Викторович

Физические и технические основы  
ахроматической интерференционной коронографии.

01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», 01.04.05 «Оптика»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Москва — 2009

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы  
Института Космических Исследований Российской Академии Наук.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
доктор технических наук, профессор  
доктор технических наук

**Левин Геннадий Генрихович**  
**Зверев Виктор Алексеевич**  
**Чёрный Игорь Владимирович**

Ведущая организация:

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» ФГУП ЦНИИмаш

Защита планируется 22 декабря 2009 г. в 12 часов на заседании  
Диссертационного совета Д 002.113.01 в конференц-зале Института Космических  
Исследований РАН по адресу Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.01,

кандидат физ.-мат. наук

В. В. Акимов

## **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа посвящена физико-техническим основам ахроматической интерференционной коронографии для непосредственного наблюдения слабоконтрастных астрономических объектов – экзопланет (планет вокруг звезд).

### **Основные направления и актуальность темы**

Современные методы обнаружения экзопланет (планет несолнечной системы) и других слабоконтрастных астрообъектов основываются на непрямых косвенных методах астрономических наблюдений. Прямые непосредственные методы наблюдения слабоконтрастных астрообъектов, например экзопланет ограничены на практике техническим требованием понизить высокий оптический контраст в модели «звезда – экзопланета» до приемлемого уровня фотодетектирования, так как яркий фоновый источник света – звезда имеет излучение на  $6\div 10$  порядков энергетически превышающее отраженное излучение слабого источника света – экзопланеты, которую из-за удаленности орбиты наблюдают на дифракционном расстоянии от звезды  $0.7\div 5$  дифракционных радиусов Эйри телескопа ( $\lambda/D$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $D$  – диаметр апертуры главного зеркала телескопа). Изменение контраста изображения как энергетически так и в латеральном направлении для слабоконтрастного объекта, находящегося вблизи *ослепляющего* яркого светового источника составляет непосредственную задачу звездной коронографии. В настоящее время проектируемые схемы звездных коронографов существенно хроматичны, что значительно сужает диапазон их практического применения и описываемое в настоящей работе ахроматическое решение представляет практический интерес. Вынос коронографа в космос поможет устранить технические ограничения функционирования систем адаптивной оптики (АО), компенсирующих искажения волнового фронта, обусловленных динамической турбулентностью атмосферы Земли до уровня достаточного, согласно с требованием звездной коронографии для наблюдения экзопланеты Земного типа.

Оптические измерительные приборы имеют высокую точность. Среди них фазовые измерения имеют максимальную точность, так как измерение нормируется на целое и дробное число длин волн оптического диапазона, составляющие доли микрометра. В настоящее время, фазовые измерения, в основном, производят посредством многочисленных классических и неклассических схем интерферометров с обработкой интерферограмм методами восстановления фазы, использующими активную или пассивную модуляции фазы. В отечественной и зарубежной литературе опубликовано достаточно большое количество обзоров по методам практической интерферометрии, в которых освещены как основополагающие составляющие метода интерферометрии, так и специальные приложения интерференционной метрологии. В настоящее время, среди новых специальных задач интерферометрии, актуальной является тема интерференционной коронографии, которая практически востребована в астрономических приложениях, например, для непосредственной визуализации света экзопланеты, детектируемой на однородном фоне засветки яркого *слепящего* света звезды. Метод интерференционной коронографии применим и для более широкого спектра оптических и радиофизических приложений. Приведем несколько примеров, где коронография способствует решению задач прецизионного контроля. Например, контроль качества волнового фронта на уровне  $\lambda/1000$  и точнее востребован в практике нанотехнологий и становится возможным посредством описываемого в настоящей работе ноль-интерферометра, реализующего точностные характеристики, превосходящие возможности известных устройств контроля волнового фронта. Другой пример – визуализация наночастицы, латеральный (линейный) размер которой на несколько порядков меньше длины волны, для чего оказывается недостаточно *классического* оптического разрешения, но возможно посредством дифференциального метода с применением предложенного в настоящей работе интерференционного коронографа. Также основополагающие принципы интерференционной коронографии могут быть применены в радарх для искусственного контрастирования объекта (цели) на фоне слепящей пространственно-узкополосной помехи. Список практических приложений звездной коронографии

можно расширить и далее. При описании задач, решаемых методом звездной коронографии необходимо, в первую очередь, остановиться на проблеме решения прямой непосредственной задачи: фильтрации излучения экзопланеты или слабоконтрастного астрообъекта на фоне яркого фона звезды, практически насыщающего фотоприемное устройство и делающего невозможным простую фоторегистрацию света слабоконтрастного объекта по причине ограниченного динамического диапазона фотоприемного устройства. Данная работа призвана кратко описать физические и технические основы для решения задачи звездной коронографии и экспериментально продемонстрировать технические подходы и положения, составляющие основу метода интерференционной коронографии. В настоящее время актуальность и востребованность интерференционного коронографа как практического прибора показаны в возрастающем числе публикаций на тему звездной коронографии (stellar coronagraphy) в специализированной, в основном, в зарубежной литературе, что составляет более 5000 литературных источников, так что метод звездной коронографии имеет высокий индекс цитируемости (импакт-фактор). Диссертант является автором *полностью ахроматического интерференционного* коронографа, по схеме интерферометра общего пути, практически обеспечивающего механическую стабильность прибора, которое было результатом творческой и практической разработки теории геометрической фазы в оптике, где диссертантом был разработан метод расчета геометрической фазы посредством тензоров Эйнштейна при неплоском распространении луча. Поэтому описание в настоящей работе как теоретических основ так и технических решений составляющих метод ахроматической интерференционной коронографии имеет смысл для ознакомления, для практического использования и для непрямого развития метода интерференционной коронографии в непосредственном и других приложениях.

Изложенные здесь различные аспекты и результаты работы получены автором за последние 15 лет. Теоретические основы этой работы, учитывающие основы геометрических фаз были положены в России, в НТЦ НаноТех и в Институте Структурной Макрокинематики РАН, когда изучалась интерпретация

высококонтрастного фазового и поляризационного оптического изображения отраженного рельефом поверхности. Далее метод учета и описания геометрической фазы был творчески доработан в Токийском Университете Электросвязи, где автор работал приглашенным ученым. Первый ноль-интерферометр был разработан автором в Германии в Университете г. Штутгарт в Институте Прикладной Оптики, эти работы были впоследствии продолжены в Японии в Национальной Астрономической Обсерватории в г. Токио. Сейчас автор привнес и развивает направление практической коронографии в Институте Космических Исследований РАН в г. Москве, где данная тематика входит в список исследовательских тем института.

### **Цель и задачи работы.**

Целью настоящей работы было исследование возможности применения в практической интерферометрии модуляции ахроматической геометрической фазы количественно для практической звездной коронографии с высоким контрастом  $10^6 \div 10^{10}$ , (ранее применявшейся, в основном, только для качественной демонстрации коронографических возможностей с контрастом  $10^2$ ). В процессе работы, после выявления широких возможностей предложенной схемы неплоского интерферометра, модулирующего геометрическую фазу, возникла задача создания практического инструмента – звездного коронографа с характеристиками, требуемыми для непосредственного наблюдения света экзопланеты Земного типа: ослабления или зануления света звезды для детектирования света экзопланеты. Выявленные возможности интерферометрии по схеме модифицированного интерферометра Саньяка – неплоского интерферометра общего пути вращательного сдвига проходили экспериментальную проверку в лабораторных условиях и практически показали требуемый коронографический контраст в рамках проектов, финансировавшихся как по зарубежным грантам (COE, JSPS) в Национальной Астрономической Обсерватории Японии так и Институтом Космических Исследований РАН.

Объектами экспериментальных исследований были тестовые дифракционные изображения (функции рассеяния точки ФРТ) звезды и планеты,

модифицированные и контрастированные ахроматическим интерференционным коронографом.

### **Новизна работы.**

В работе разработан комплекс новых методов исследования для непосредственного наблюдения слабоконтрастных объектов (экзопланет) на фоне сильного источника (звезды) посредством ахроматического интерференционного коронографа по принципу ноль-интерферометра.

Данная работа является первой, в которой интерферометрия нашла применение для ахроматического высококонтрастного изображения, достаточного для наблюдения экзопланет Земного типа.

Впервые экспериментально получен высокий коронографический контраст  $10^6$ , требуемый для режима дифракционного разрешения телескопа и сверхразрешения порядка одного и менее радиуса Эйри.

Предложен новый общий подход к увеличению пространственной когерентности в последовательных интерферометрах вращательного сдвига по принципу многолучевой интерференции.

Предложена оптическая схема двухкаскадного ахроматизированного коронографа по принципу четырехлучевого интерферометра для достижения коронографического контраста  $10^{10}$  при наблюдаемом размере звезды  $10^{-2}$  радиуса Эйри ( $\approx \lambda/D$ ).

Результаты работы могут быть представлены как «Новое направление получения высокого контраста» в звездной коронографии и в других приложениях.

### **Апробация работы и публикации**

Всего по материалам исследования опубликовано более 60 работ. Список 44 наиболее важных из них приведен в конце автореферата.

Результаты докладывались на семинарах по Физике планет в ИКИ, а также на большом количестве всероссийских, иностранных и международных симпозиумах по астрономическим инструментам и оптическим измерениям.

За последние 5 лет (2005-2009) сделано более 25 докладов на конференциях и семинарах, включая доклады с соавторами.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработан комплекс интерференционных методов ахроматической звездной коронографии, технически решающий задачу звездной коронографии – детектирование света и изображения слабого источника (например, экзопланеты) на фоне яркого источника (звезды). Разделение фонового и слабого источников происходит в механически стабильном интерферометре общего пути, одновременно для всех длин волн – ахроматично, благодаря контролируемому сдвигу геометрической фазы. Комплекс интерференционных методов содержит каскад нескольких интерферометров.
2. Создан аналитический и численный методы расчета геометрических фаз в неплоской оптической системе.  
В неплоских (трехмерных) оптических схемах происходит геометрический поворот изображения и поляризации, которые в общем случае не синхронизированы, таким образом, происходит модуляция как *классической* (динамической) фазы, так и *неклассической* (геометрической) фазы, благодаря чему соответствующие *хроматическая* и *ахроматическая* составляющие фазовой модуляции смешаны. Оптический расчет схемы неплоского интерферометра оптимизирован удобным математическим аппаратом, позволяющим разделить вклады эффектов динамической и геометрической фаз. С применением аналитического и численного методов расчета геометрических фаз в неплоской оптической системе разработаны оптические схемы каскадов ноль-интерферометра для ахроматической интерференционной коронографии.
3. Получены данные и характеристики контрастирования поля зрения:

- а). Впервые в лабораторном эксперименте продемонстрирован ахроматический коронографический контраст  $10^6$  при угловом разрешении менее одного диска Эйри ( $<1 \cdot \lambda/D$ , где  $D$ -диаметр апертуры телескопа).
- б). С применением фотоэлектронного умножителя с динамическим диапазоном  $\approx 10^6$  измерено ослабление фонового сигнала при последовательном наклоне оптической оси интерферометра и источника.
- в). Измерения, осуществленные посредством охлаждаемой ПЗС (ССД) камеры подтвердили ахроматический коронографический контраст  $10^6$  и визуализировали последующие инструментальные ограничения коронографического контрастирования поля зрения, вызванные конечным качеством оптических поверхностей, точностями юстировок и т. п.
- г). Показана перспектива прецизионной коррекции волнового фронта по методу несбалансированного интерферометра.

**4. Сформулированы закономерности увеличения пространственной когерентности удаленного источника света – звезды.**

- а). Для достижения коронографического контраста  $10^{10}$  в видимом диапазоне длин волн, следует учитывать, что физический размер диска звезды формирует протяженный источник света с недостаточной степенью пространственной когерентности для требуемого  $10^{10}$  коронографического погашения такого протяженного источника света в темном поле интерференции ахроматическим интерференционным коронографом (АИК) с практическим размером апертуры главного зеркала телескопа  $\approx 1$  м. Метод двухлучевой интерференции имеет практически недостаточный коронографический контраст менее  $10^5$  при отношении  $10^{-2}$  размера источника к диаметру дифракционного диска Эйри  $\approx \lambda/D$ .
- б). Показано, что тандем двух последовательных интерферометров вращательного сдвига реализует четырехлучевую интерференцию, темное поле которой содержит коронографический контраст более  $10^{10}$ . Полученный эффект достигают благодаря специальной синтезированной функции когерентности в схеме эффективной многолучевой интерференции.

### **Научная и практическая значимость работы**

Создан интерференционный коронограф, позволяющий разделить излучение фона (звезды) и слабое излучение объекта наблюдения (экзопланеты), имеющий ряд преимуществ перед другими коронографическими методами. Многие выявленные возможности, в тех или иных условиях, являются уникальными.

Разработанные методы и интерференционный коронограф применяются при проведении НИР в ИКИ РАН и в Японской Национальной Астрономической Обсерватории. Они используются при разработке коронографа космического базирования.

В частности, предложенный метод коронографии перечислен в [1] в качестве единственного ахроматического коронографа, реализующего коронографический контраст  $10^{10}$ .

**Личный вклад** автора состоит в разработке нового направления звездной ахроматической интерференционной коронографии с требуемыми на практике коронографическими контрастами, достаточными для непосредственного наблюдения экзопланет в инфракрасном и видимом диапазоне длин волн. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором или при определяющем вкладе автора.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, общих выводов и списка литературы. Объем диссертации – 250 страниц, содержащие 120 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит более 220 ссылок.

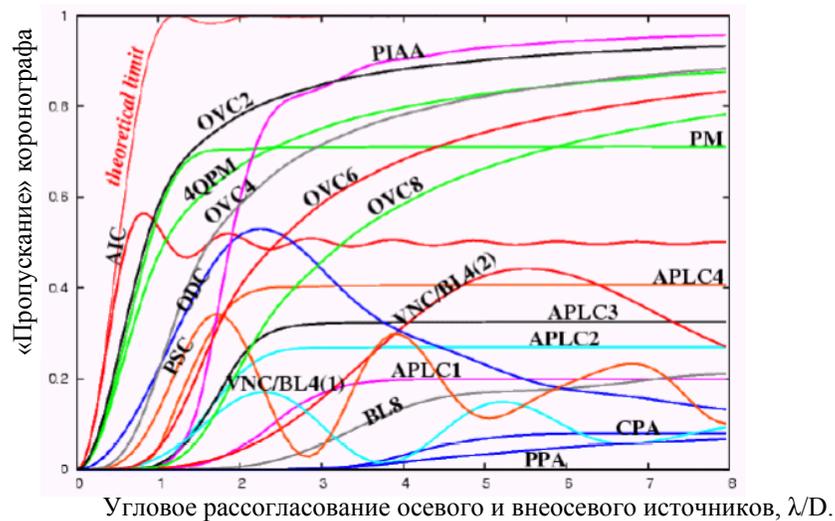
## Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертационной работы, приводится краткое содержание работы, отмечена научная новизна и практическая ценность проведенных исследований, описаны основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы.

**В первой главе** проведен сравнительный анализ известных современных методов обнаружения слабоконтрастных астрообъектов – экзопланет [2], который отделяет метод звездной коронографии в качестве объекта экспериментального исследования и инструментального решения, изложены основные методы звездной коронографии, основы интерферометрии, основополагающие понятия геометрических фаз и приведен обзор литературы по применению интерферометрии для ослабления света и создания ахроматической коронографии высокого контраста.

В параграфе **1.1.** кратко показаны существующие астрономические методики опосредованного обнаружения и изучения экзопланет: метод измерения *радиальной скорости*, метод *транзитов*, астрометрический метод, *микрولينзирование*, *поляризационные транзиты* [3]. В разд. **1.2.** приведены условия непосредственного наблюдения экзопланет, контрасты  $10^6$  и  $10^9$  в ИК и в видимом спектральных диапазонах, соответственно [4], ожидаемые световые потоки звезды и планеты и показаны функциональные возможности ноль-интерферометрии (разд. **1.3.**) [5, 6] и коронографии (разд. **1.4.**) [8]. Перечислены известные типы звездных коронографов и основные коронографические характеристики, произведен сравнительный анализ характеристик различных типов коронографов. В частности, интерференционный коронограф (AIC – Achromatic Interfero Coronagraph) [7], **Рис. 1.**, показывает коронографическое «пропускание» наиболее близкое к теоретическому пределу, согласно опубликованных в [8] величин «пропускания» коронографов различных типов в зависимости от углового рассогласования осевого и внеосевого источников, таким образом, для

интерференционного коронографа диаметр главного зеркала телескопа возможно уменьшить приблизительно в два раза при сохранении номинального разрешения телескопа. В разд. 1.5. приведен анализ требований и устройств компенсации искажений волнового фронта методами адаптивной оптики (АО) [9] для звездной коронографии. В разд. 1.6. описаны основы измерительной интерферометрии [10, 11]. В разд. 1.7. приведен механизм модуляции геометрической фазы [12, 13] для реализации ахроматического фазового сдвига, разд. 1.8. Характеристики недетерминированных статистических aberrаций даны в разд. 1.9.



**Рис. 1.** Сравнение «пропускания» для коронографов известных типов [8].

**Вторая глава содержит** описание разработанных физических и технических основ метода «новой» ахроматической интерференционной коронографии, включающие метод расчета динамических и геометрических фаз: геометрической фазы Панчаратнама и геометрической фазы перенаправления спина. Приведены теоретические основы интерференционной коронографии и описана возможность увеличения степени пространственной когерентности системой последовательных интерферометров вращательного сдвига для достижения более высокого коронографического контраста при конечном размере фонового источника. Проанализированы метрологические требования для практического ноль-контраста  $10^6 \div 10^{10}$ . Даны оценки ахроматичности и рекомендации для ахроматизации каскадного интерферометра.

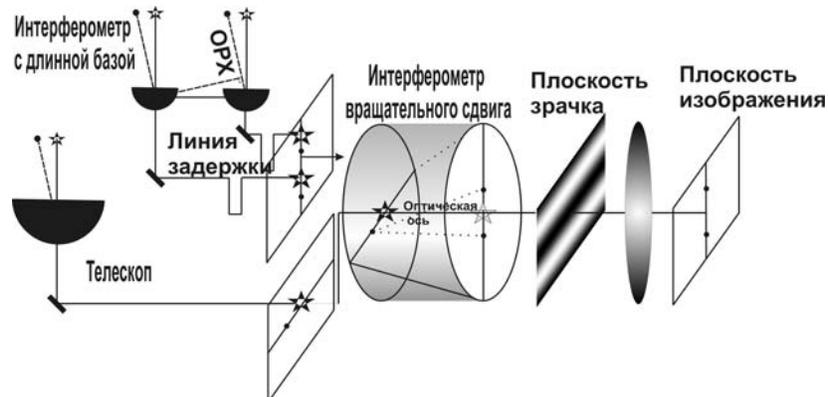
В разд. 2.1. приведена разработанная методика расчета фазы, измеряемой неплоским интерферометром при смешении геометрических фаз [14, 15, 16] и динамических фаз. Световая волна претерпевает одновременные изменения в “ $k$ ” – пространстве направлений волнового вектора ( $k$ -сферы направлений) и в пространстве поляризаций (сферы Пуанкаре), поэтому традиционный графический анализ геометрической фазы по величине телесного угла в одновременно двух отдельных пространствах состояния волны (поляризации и направления) неудобен и затруднен.

Алгебра векторов и матриц Джонса аналитически продолжена [Tavrov A. *et al.* 1999 JOSA, Tavrov A. *et al.*, 2000 JOSA] в трехмерное пространство  $3 \times 3$  ( $\mathcal{R}^3$ ), учитывая вложение пространства  $\mathcal{R}^2$  в  $\mathcal{R}^3$ . Разработан аналитический алгоритм для определения поворота пространства  $\mathcal{R}^2$  на угол, определяющий геометрическую фазу волны при наличии эффектов Френеля, обуславливающих фазовые и амплитудные коэффициенты отражения, неотъемлемо влияющие на поворот поляризации и фазу. Применяя разработанный метод расчета стало несложно проследить геометрические повороты поляризации (вдоль геодезических линий) и отделить их от вкладов Френелевских поворотов поляризации [17] путем поэлементного расчета сложной оптической системы, включающей произвольный набор преломлений и отражений.

Разработанный алгоритм расчета геометрической фазы был применен на практике и найден ряд схмотехнических решений механически стабильного ахроматического интерференционного коронографа (АИК) по схеме кольцевого ноль-интерферометра *общего пути* [Tavrov A. *et al.* 2002 *Opt. Lett.*, Tavrov A. *et al.* 2005 *Opt. Lett.*, 18], практически заменяющего ранее известную схему механически нестабильного АИК [19].

Таким образом, решена проблема построения стабильного ахроматического ноль-интерферометра в приложении к задачам интерферометрии с длинной базой и звездной коронографии, **Рис. 2.** разд. 2.2. Применительно к задаче интерферометрии с длинной базой, (схематично показанной сверху слева) и коронографии после телескопа с большой апертурой главного зеркала (внизу слева), оптическая разность хода (ОРХ) между двумя плечами интерферометра

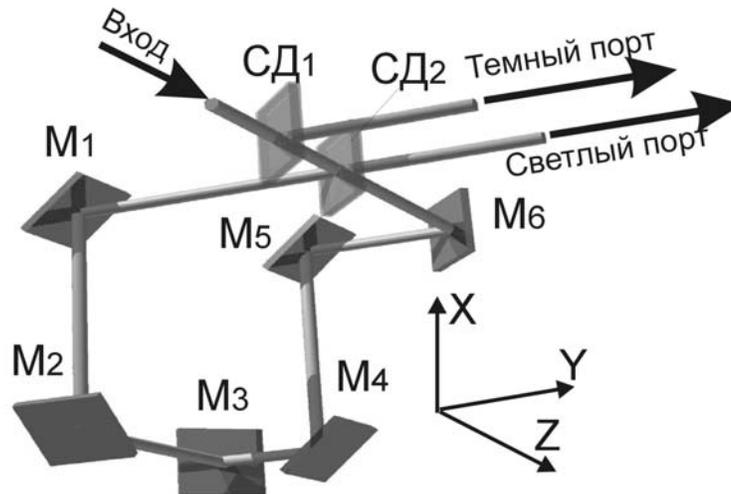
равна нулю в случае осевого источника (обозначенного звездочкой). Ноль-интерферометр привносит разность фаз равную  $\pi$ - радиан, обусловленную эффектом геометрической фазы. Ноль-интерферометр построен по схеме интерферометра вращательного сдвига [ 20 , 21 , 22 ] – дифференциального интерферометра с геометрическим поворотом опорного волнового фронта. Внеосевой источник (планета), (обозначенный точкой на **Рис. 2.**), приобретает ненулевую ОРХ и в плоскости зрачка показывает интерференционную картину с локализацией темной интерференционной полосы сцентрированной относительно оптической оси интерферометра вращательного сдвига. Если собрать весь свет внеосевого источника, проинтегрировав периодическую интерференционную картину по всему зрачку оптической системы, то для последующей фоторегистрации интерферометр существенно не ослабит сигнал внеосевого источника.



**Рис. 2.** Принцип ослабления фонового осевого сигнала звезды.

В разд. 2.2. приведено описание разработанного [Тавров А. В., 2008 ЖЭТФ] трехмерного интерферометра (Саньяка), обеспечивающего фиксированный полуволновой сдвиг геометрической фазы между интерферирующими волнами и механически стабильную нулевую ОРХ тем, что два плеча интерферометра геометрически совмещены и две волны распространяются по одному и тому же общему пути в противоположных направлениях навстречу друг другу, **Рис. 3.** Схема ноль-интерферометра автоматически компенсирует хроматичности светоделителей и зеркал, благодаря распространению двух интерферирующих волн

по одинаковому пути. Две интерферирующие волны имеют равные спектральные интенсивности, что является необходимым, но нетривиальным условием для ахроматического зануления – погашения сигнала темным полем деструктивной интерференции [ 23 ]. *Классически* нулевая, а не полуволновая разность фаз содержит ахроматизм [24].

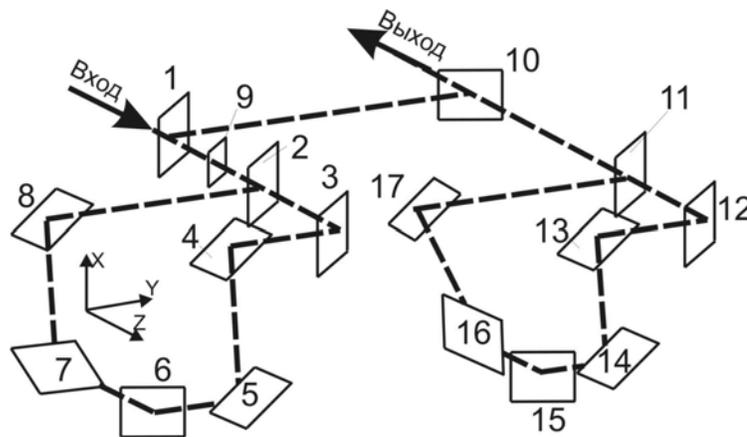


**Рис. 3.** Оптическая схема неплоского нуля интерферометра.

Ахроматический интерференционный коронограф имеет наилучшее угловое разрешение по сравнению с другими типами коронографов [25], (разд. 1.4). В частности, АИК разрешает без существенного ослабления оптического сигнала внеосевой источник – экзопланету, на фоне осевого источника на угловом расстоянии, равном  $\sim 0.6 \cdot \lambda/D$ , т.е. осуществляет детектирование внутри дифракционного диска Эйри. Формально область углов: менее  $0.6 \cdot \lambda/D$  до  $1.22 \cdot \lambda/D$  является практическим *сверхразрешением* [19], что составляет важное преимущество метода АИК, так как размер телескопа можно уменьшить на 40÷60%.

В разд. 2.3. рассмотрена зависимость степени ослабления фонового источника от его видимого углового размера. Интерферометр вращательного сдвига, складывает волновые фронты с взаимным поворотом на  $180^\circ$ , обуславливая зависимость степени ослабления сигнала – интерференционного контраста от функции когерентности источника света [ 26 ]. Поэтому в качестве

принципиального недостатка метода АИК следует отметить повышенную чувствительность метода к угловому размеру осевого протяженного источника, что в задаче коронографии приводит к невозможности ослабить до требуемого уровня свет звезды, которая является *естественным протяженным некогерентным* источником света, имеющим конечный угловой размер [27]. Теоретический предел ослабления света осевого источника (зануления) методом АИК составляет  $\sim 4 \cdot 10^4$  для звездного диска с *наблюдаемым* угловым диаметром  $10^{-2} \lambda/D$ . Поэтому практическое использование методов АИК было ограничено из-за того, что излучение звезды, собранное во входном зрачке телескопа не имеет достаточной степени пространственной когерентности. Для решения задачи недостаточной пространственной когерентности света от протяженного источника, предложено использовать два (или несколько) интерферометров соединенных последовательно [Тавров А. *et. al.* 2008 *Applied Optics*, Тавров А. В. 2009 *ЖЭТФ*]. Подробно рассмотрены возможности тандемной схемы двух интерферометров, каждый из которых реализован по схеме интерферометра общего пути и одновременно по схеме интерферометра вращательного сдвига, которые соединены последовательно для эффективной четырехлучевой интерференции при конструктивном сохранении механической стабильности, **Рис. 4.**



**Рис. 4.** Схема двух последовательных интерферометров, эффективно увеличивающих пространственную когерентность для улучшения коронографического контраста (3-8, 12-17 – зеркала, 1-2, 10-11 – светоделители, 9 – четвертьволновая пластина).

В разд. 2.4. произведено теоретическое сравнение ноль-контрастов между схемами одиночного и двух последовательных ноль-интерферометров. В одиночном АИК звезда, представленная протяженным источником – равномерно освещенным диском с видимым угловым размером  $\Theta$ , ослабляется коронографом в плоскости изображения телескопа с диаметром главного зеркала  $D$  до теоретически возможного коронографического контраста  $\overline{NC}_1$ :

$$\overline{NC}_1 = \frac{1 - (1 - J_0(s)) / (s/2)^2}{1 + (1 - J_0(s)) / (s/2)^2}, \quad (1)$$

где  $s = \pi \Theta D / \lambda$  – эффективный размер фонового источника:

$\Theta$  – видимый угловой размер фонового источника (звезды),

$1,22 \cdot D / \lambda$  – дифракционное разрешение телескопа.

Максимальный теоретический коронографический контраст  $\overline{NC}_\Sigma$  на темном порте двух последовательных интерферометров описывает формула:

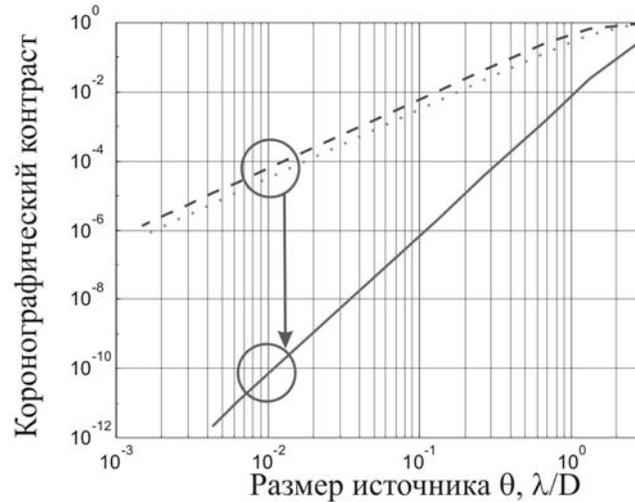
$$\overline{NC}_\Sigma = \frac{1 + [1 - J_0(s)] / (s^2/4) - 2 [1 - J_0(s/\sqrt{2})] / (s^2/8)}{1 + [1 - J_0(s)] / (s^2/4) + 2 [1 - J_0(s/\sqrt{2})] / (s^2/8)}. \quad (2)$$

В разд. 2.5. приведено графическое сравнение ноль-контрастов, заданных формулами (1) и (2), **Рис. 5**, иллюстрирует возможность увеличения коронографического контраста в двух последовательных интерферометрах на шесть порядков [Тавров А. et. al. 2008 *Applied Optics*, Тавров А. В. 2009 *ЖЭТФ*] до требуемого значения коронографического контраста для видимой области спектра  $10^{10}$  [25].

Формулы (1)-(2), полученные аналитически были проверены приведенными в разд. 2.6. численными методами вычисления коронографического контраста, где протяженный источник был смоделирован суперпозицией некогерентных точечных источников.

В разд. 2.7. приведены метрологические аспекты для практической реализации коронографических контрастов  $10^6$  и  $10^{10}$ , в частности, угловая настройка осей зеркал интерферометра не превышает технически достижимых

допусков:  $0,1^\circ$  и  $1$  угл. секунды, соответственно [Тавров А. В. 2009 ЖТФ]. Точность поляризационных элементов практически реализуема стандартными оптическими компонентами. В разд. 2.8. приведены рекомендации по ахроматизации каскадного ахроматического коронографа по схеме Рис. 4.



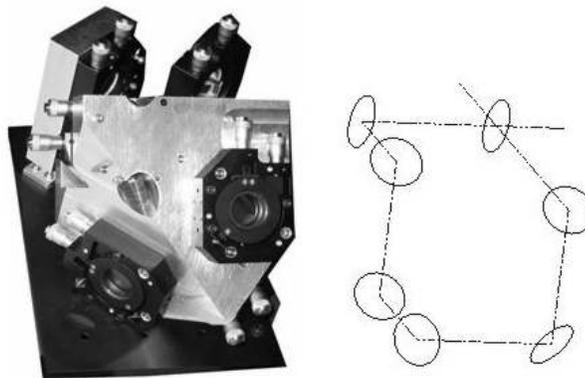
**Рис. 5.** Зависимости ноль-контрастов  $\overline{NC}_1(\theta)$ ,  $\overline{NC}_\Sigma(\theta)$  от углового размера источника  $\theta$  в единицах разрешения телескопа  $\sim \lambda/D$ , согласно формулам (1)-(2):  $\overline{NC}_1(\theta)$  – штриховая линия,  $\overline{NC}_\Sigma(\theta)$  – сплошная линия.

В разд. 2.9. приведена оценка ограничения коронографического контраста при круговом вращении Земли или орбитальном вращении МКС, где планируется установить АИК, вследствие эффекта Саньяка [28], в частности, показано, что при конструктивной длине ребра интерферометра  $\sim 100$  мм ухудшение контраста возможно на уровне  $10^{15}$ , которое слабее предельного коронографического контраста на пять порядков. Предельный контраст  $10^{10}$  уменьшается, если критическое значение ребра интерферометра превышает 3 м.

**В третьей главе** приведено техническое описание разработанного ноль-интерферометра – коронографа, описаны лабораторные эксперименты с ноль-интерферометром, приведены картины визуализации области пространственной когерентности и обсуждены эксперименты по ослаблению белого света, доказывающие эффект ахроматического зануления, приведены эксперименты по

занулению пространственно-когерентного лазерного излучения, экспериментально получены требуемый для ИК области коронографический контраст лучше  $10^6$  при угловом рассогласовании источников внутри первого дифракционного кольца Эйри. Приведены технические описания лабораторных макетов интерференционного коронографа по схеме одиночного ноль-интерферометра и тандема двух последовательных интерферометров вращательного сдвига, произведено экспериментальное сравнение картин интерференции с одиночным интерференционным коронографом, экспериментально показан эффект улучшения пространственной когерентности.

В разд. **3.1.** конструктивно описан экспериментальный образец интерферометра – ахроматического коронографа, сконструированный для демонстрации эффекта ахроматического зануления – широкополосного ослабления фонового оптического излучения осевого источника и для изучения характеристик и особенностей предложенного метода посредством простого эксперимента. Схема и фотография ноль-интерферометра приведены на **Рис. 6.** [Tavrov A. *et. al.* 2005 *Opt. Lett.* ].



**Рис. 6.** Фотография и пространственная схема ноль-интерферометра.

Оптическая схема лабораторного эксперимента приведена на **Рис. 7.**, в эксперименте были использованы два независимых источника света: галогеновая лампа белого цвета и суперлюминесцентный светодиод, которые были ориентированы относительно оси интерферометра соосно и с небольшим

наклоном, соответственно. Коллимированные пучки от двух источников света складывали посредством светоделителя СД<sub>0</sub>.

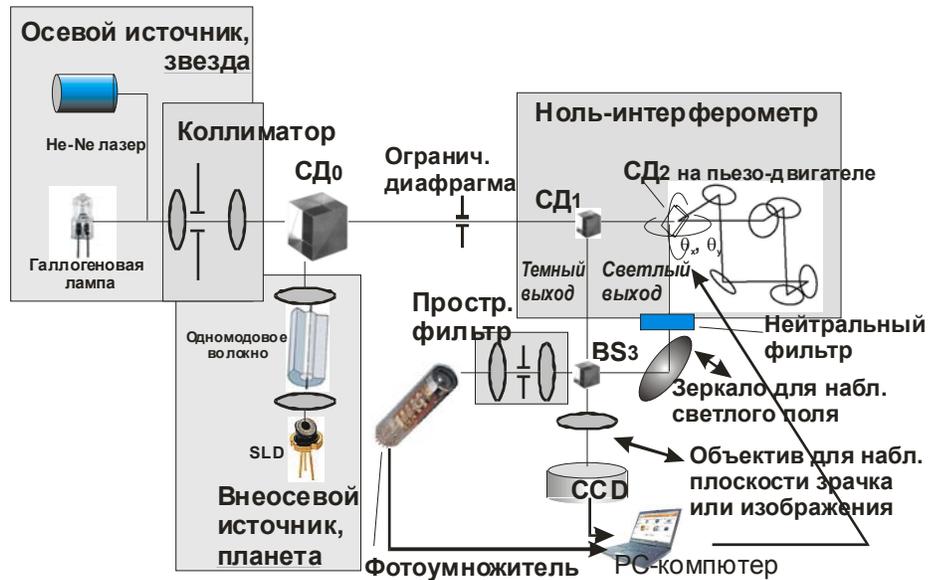
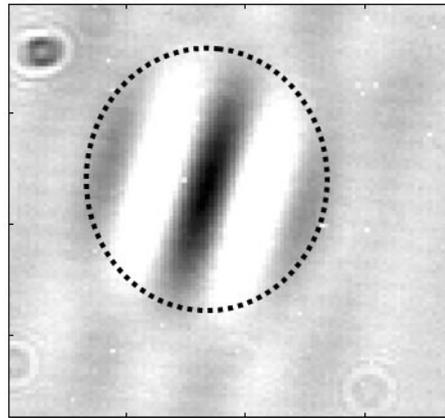


Рис. 7. Оптическая блок-схема эксперимента.

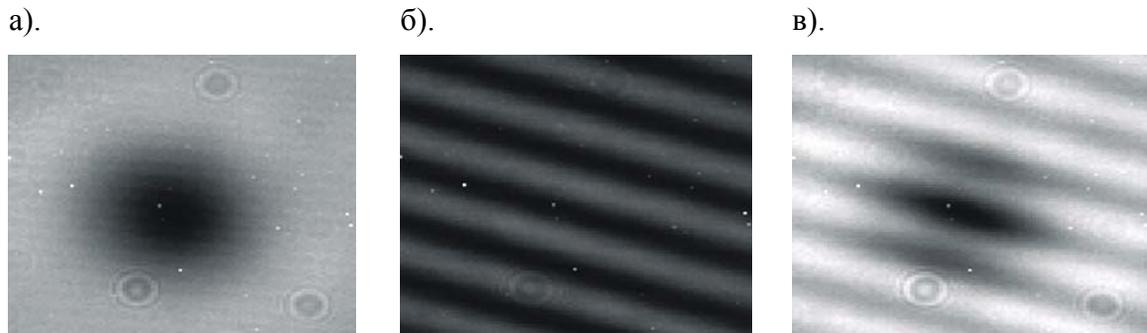
Для получения пространственной когерентности свет от указанных источников был пропущен через пространственные фильтры. Для измерения ноль-контраста  $NC \approx 10^{-3}$  в белом свете от галогеновой лампы, устанавливали угловой размер источника  $\approx 10$  угловых секунд  $\approx 0.02 \cdot \lambda/D$  единиц радиуса Эйри на  $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ .

Изучение аппаратных ограничений по ослаблению сигнала проводили также и с пространственно когерентным светом однододового He-Ne лазера. Ослабленный сигнал с «темного» выхода интерферометра сравнивали с опорным сигналом, полученным со «светлого» выхода интерферометра. «Светлый» выход интерферометра содержал attenuator – калиброванный нейтральный фильтр. Два оптических сигнала, полученные с «темного» и «светлого» портов совмещали для одновременной регистрации с небольшим латеральным рассогласованием в поле фотоприемного устройства ССД (ПЗС) камеры или поочередно направляли на ФЭУ.

При конечном размере источника в разд. 3.2. приведено наблюдение области пространственной когерентности, **Рис. 8**. Интерференционный принцип получения коронографического контраста качественно показан на **Рис. 9**, где темная центральная полоса интерференции обусловлена интерференцией осевого протяженного источника – (а), прямолинейные интерференционные полосы с большей пространственной частотой соответствуют точечному внеосевому источнику света – (б), картина интерференции при одновременном включении осевого и внеосевого источников показана на **Рис. 9** (в). Полосы интерференции локализованы существенно различно от осевого и внеосевого источников.



**Рис. 8.** Интерференция внеосевого протяженного источника.



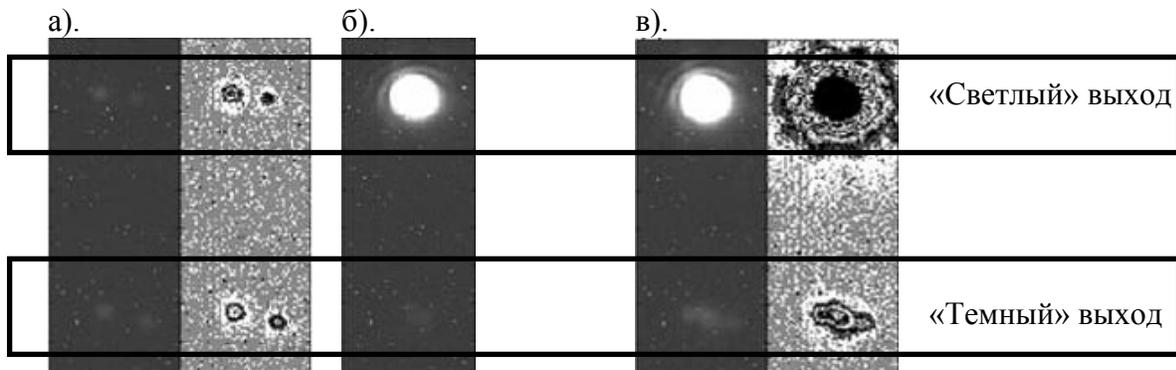
**Рис. 9.** Интерференционные картины в плоскости зрачка. (а) – Интерференция протяженного осевого источника. (б) – Интерференция точечного внеосевого источника. (в) – Совмещение двух интерференционных картин (а) и (б).

В задаче коронографии детектируют излучение внеосевого источника (планеты), которое содержится в чередующихся интерференционных полосах на фоне практически темного поля от осевого источника, полученного в результате

деструктивной интерференции излучения слабо протяженного осевого источника (звезды).

Ахроматическое зануление в непрерывном спектре галогеновой лампы с шириной спектра более 400 нм., экспериментально зафиксировано и приведено в разд. 3.3. Согласно закону сохранения энергии, сигналы «темного» и «светлого» выходов интерферометра комплиментарные, т. е. если на «темном» выходе наблюдают темную полосу интерференции, то одновременно на «светлом» выходе интерференции наблюдают светлую полосу интерференции, поэтому интенсивность «светлого» выхода была использована в качестве опорного сигнала, с которым и производили сравнение ослабленного фонового сигнала.

В эксперименте при записи коронографических изображений в белом свете (с непрерывным спектром) осевого источника, показанных на **Рис. 10.**: (а) – электрически был включен только внеосевой источник, парное изображение которого наблюдали на двух выходах интерферометра: «светлом» и «темном» (вверху и внизу).

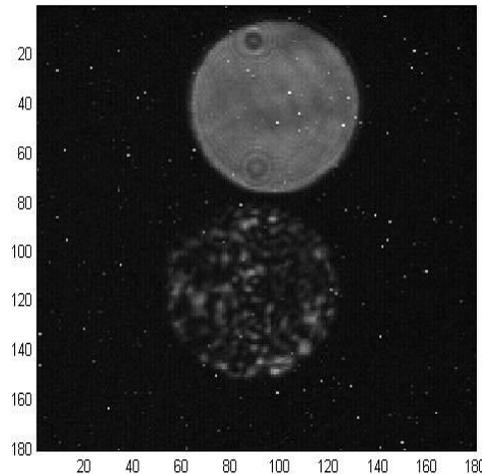


**Рис. 10.** Экспериментальное подтверждение ахроматичности ноль-интерферометра при занулении белого света галогеновой лампы 400 ÷ 800 нм. (а): Электрически включен только внеосевой источник. (б): Электрически включен только осевой источник. (в): Включены два источника: осевой и внеосевой.

**Рис. 10.** (б) – включен электрически только осевой источник белого света. В верхней половине поля зрения – в области «светлого» выхода АИК наблюдают излучение осевого источника. Внизу поля зрения на «темном» выходе детектируют слабый уровень остаточного сигнала – незануленного осевого источника. **Рис. 10.** (в) – включены электрически сразу два источника: осевой и внеосевой, внизу поля

зрения на «темном» выходе на ослабленном фоне осевого источника четко различимо раздвоенное изображение внеосевого источника, (см. изображение повышенного контраста справа). Энергетическое соотношение «темного» и «светлого» портов показывает величину около трех порядков, что находится в хорошем соответствии с оценкой предельно возможного ослабления, ограниченного видимым угловым размером  $\approx 0.02\lambda/D$  протяженного осевого источника.

В разд. 3.4. приведены эксперименты по занулению лазерного источника света, которые имели цель практического изучения предельно возможного ослабления света, так как фактор недостаточной пространственной когерентности был устранен использованием пространственно-когерентного лазерного излучения, то изучали аппаратурные факторы, ограничивающие контраст ослабления осевого сигнала. В плоскости зрачка оптической системы наблюдали спекл-поле, обусловленное рассеянием при отражении от оптических поверхностей с остаточной микрошероховатостью, **Рис. 11.**

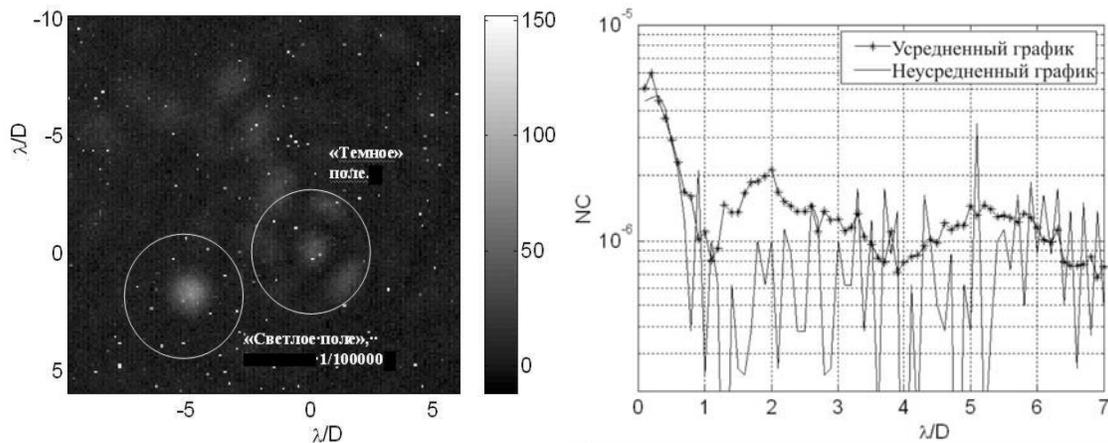


**Рис. 11.** «Светлое» поле интерференции сверху и «темное» поле интерференции внизу. «Светлое» поле ослаблено в  $2 \times 10^4$  раза.

Экспериментально зафиксированный ноль-контраст, усредненный по плоскости зрачка имел значение  $\approx 5 \cdot 10^5$ , что приблизительно соответствует среднеквадратичной оценке высоты микрорельефа поверхности, модулирующего

отраженный волновой фронт  $\delta_{rms} \approx \lambda/400$  на  $\lambda = 630$  нм. Оценка  $\lambda/400$  составляет приблизительно половину суммы всех aberrаций волнового фронта, присутствующих в системе АИК из-за того, что симметричные aberrации эффективно устраняются АИК [29] и составляют статистическую половину суммарной aberrации [30].

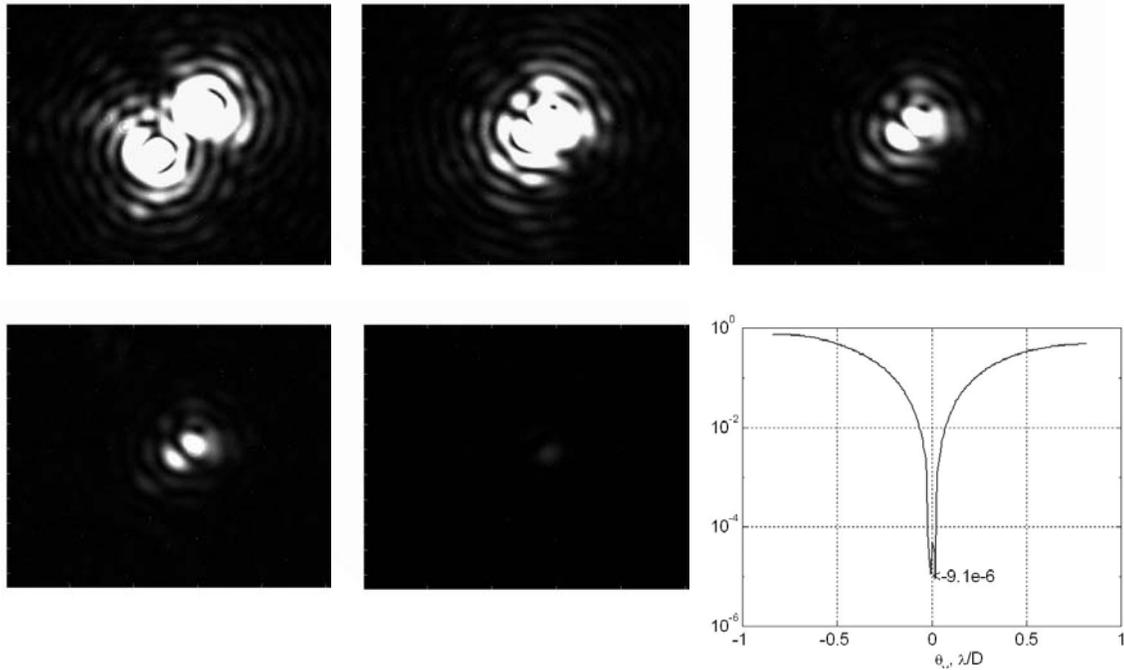
В плоскости изображения на  $\lambda=632,8$  нм ноль-интерферометр показывал сигнал, ослабленный до пикового уровня приблизительно  $6.5 \times 10^{-6}$ , **Рис. 12**. Приведенные справа радиальные сечения картин интенсивностей получены с «темного» выхода интерферометра и, в частности, сечение, вычисленное усреднением по всем радиальным сечениям, с началом в центре, совмещенным с положением оси ноль-интерферометра показывает ослабление пространственно-когерентного сигнала ниже уровня  $10^{-6}$  при угловом положении источника  $1 \cdot \lambda/D$ , что на сегодня составляет рекордный результат коронографии [Tavrov A. *et. al.* 2007 *Appl. Opt.*] без коррекции волнового фронта.



**Рис. 12.** Ослабление осевого источника в плоскости изображения (справа), «светлый» сигнал показан ослабленным в  $10^5$  раз. Усредненный и неусредненный радиальные профили (слева).

С целью визуализации ноль-контраста в динамическом диапазоне  $10^5 \div 10^6$  для изучения динамики ослабления сигнала производили последовательное погашение фонового сигнала наклоном оси источника к оси интерферометра, показанное на **Рис. 13**. Измеренная фотоумножителем картина динамики

погашения сигнала в диапазоне  $10^6$ , соответствует теории и показана на **Рис. 13** справа внизу.

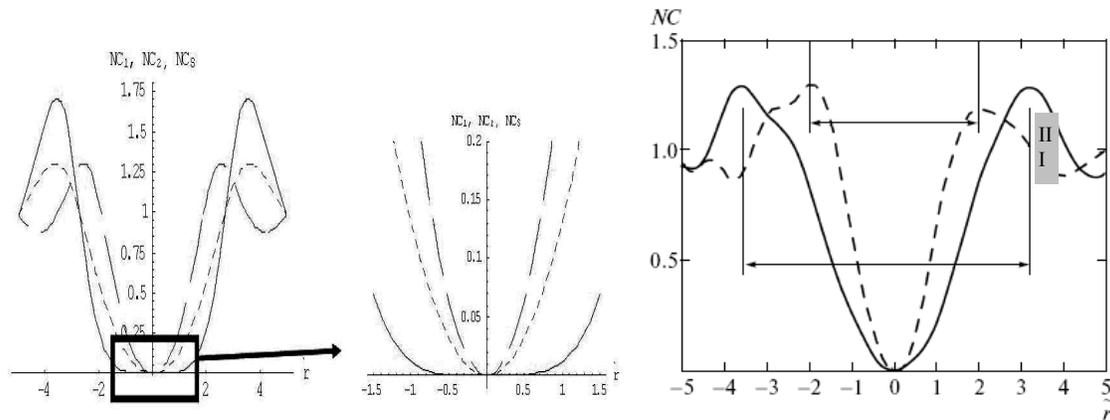


**Рис. 13.** Покадровая съемка погашения сигнала на «темном» выходе интерферометра при угловом рассогласовании оптических осей источника и интерферометра. Справа внизу: Экспериментальная зависимость сигнала от угла наклона источника.

В разд. **3.5.** приведено описание оптической схемы АИК по схеме тандема двух последовательных интерферометров вращательного сдвига. В разд. **3.6.** приведено сравнение теоретической (разд. **2.5.**) и экспериментальной картин интерференции в плоскости зрачка оптической системы для одиночного ноль-интерферометра и для тандема интерферометров. Качественно продемонстрирован эффект увеличения пространственной когерентности в интерференционном коронографе по схеме тандема двух интерферометров по анализу формы функции когерентности: аналитические зависимости распределений интерференционного (коронографического) контраста для случаев одиночного интерферометра (I) и тандемного интерферометра (II) от радиальной координаты в плоскости зрачка, приведены на графиках **Рис. 14**, слева и в центре. Формы графиков в нижней части существенно различны и подтверждены качественным экспериментом **Рис. 14**,

справа – тандемный интерферометр имеет улучшенный коронографический контраст в области малых источников.

В четвертой главе проанализированы условия применения звездного ахроматического интерференционного коронографа в наземных условиях и в космическом эксперименте. Сформулированы технические требования по точности гидирования и информационному потоку передачи данных интерференционного коронографа как инструмента телескопа. Предложена и описана новая методика прецизионной коррекции волнового фронта методом несбалансированного интерферометра [31, Nishikawa J., ... Tavrov A. *et. al.* 2008 *Proc. SPIE*, Kotani T., ... Tavrov A. *et. al.* 2007 *Proc. Lyot conference*], для достижения высокого коронографического контраста оптической системой телескопа и коронографа, имеющей номинальные инструментальные погрешности. В качестве сравнения приведен метод компенсации волнового фронта атмосферной турбулентности и улучшение ноль-контраста в наземном коронографе НИСАО телескопа Субару. Описан метод расчета aberrаций в гибридной оптической системе, состоящей из классических стеклянных линз и дифракционных оптических элементов. Описаны рекомендации применения общих принципов звездной коронографии в неастрономических приложениях.



**Рис. 14.** Коронографические контрасты в зависимости от радиальной координаты. Аналитические зависимости слева и в центре. Область малых источников увеличена на рисунке в центре. Эксперимент – справа. График (I) показан штриховой линией, (II) – сплошной линией.

Применение АИК запланировано как в наземных обсерваториях при астрономических наблюдениях, так и в космическом эксперименте. В наземных астронаблюдениях сравнительно просто решаемые вопросы настройки, наведения, гидирования, обеспечения информационного потока данных, управления и обслуживания прибора АИК скомпенсированы пока недостаточной, технически несовершенной компенсацией волнового фронта [ 32 ]. Также остаточные геометрические и хроматические аберрации последовательных систем телескопа, устройства компенсации волнового фронта, оптики переноса зрачка внутрь коронографа и др. увеличивают неточности прибора АИК и как следствие понижают качество коронографического изображения [33]. Наземные телескопы большого диаметра, например, японский телескоп Субару (с диаметром главного зеркала 7,9 метров) оснащаются монохроматическими коронографами *первого поколения* (CIAO, HiCIAO) [Tamura M., ... Tavrov A. *et. al.* 2007 *Proceedings of the conference In the Spirit of Bernard Lyot*], но параллельно обсуждаются критические требования к системам адаптивной оптики для компенсации волнового фронта [34].

Телескопы космического базирования не требуют динамической коррекции волнового фронта, такие как телескоп Хабл (НАСА, США) и др. Российские изделия (пока двойного назначения) в будущих версиях целенаправленных отдельных астрофизических разработок станут идеальными астрономическими площадками для непосредственного наблюдения слабоконтрастных объектов, экзопланет с орбиты Земли, или из точек Лагранжа, где возмущения орбиты минимальны. Автоматизация гидирования и сбора-передачи данных с удаленных автоматических аппаратов представляет собой технически решаемые задачи. В качестве отработки методики космического коронографического эксперимента возможны несколько этапов: например, небольшой 70 см. телескоп на МКС, оснащенный коронографом АИК, микроспутник с телескопом диаметром главного зеркала 80 см. ÷ 1,5 м., более сложный большой космический телескоп диаметром главного зеркала более 3,5 метра, оснащенные коронографом. Для успешного создания действующего коронографа, возможно и необходимо обобщить накопленный теоретический и практический опыт по АИК. Основными

параметрами которого являются точности и постоянные времени гидирования, требование к качеству волнового фронта телескопа и необходимый поток данных для управления и эксплуатации АИК на удаленном от Земли космическом аппарате.

В разд. 4.1. приведены технические требования по точности гидирования телескопа с интерференционным коронографом и приведено сравнение точностей гидирования для одиночного АИК и каскадного АИК. Допустимо угловое рассогласование фоновой звезды и экзопланеты менее номинального разрешения телескопа  $1.22 \cdot \lambda/D$ , т. е. фракция радиуса диска Эйри, при этом прохождение сигнала внеосевого источника (планеты) через коронограф остается конечной измеряемой величиной, зависящей как от углового рассогласования и так и от видимого размера источника фонового источника. Прохождение сигнала внеосевого источника через коронограф – пропускание одиночного АИК  $T_{одиноч.}$  определяет формула:

$$T_{одиноч.} = 0.5 \left( 1 - \frac{J_1(2\pi\theta_{\lambda/D})}{\pi\theta_{\lambda/D}} \right) / \left( 1 + \frac{J_1(2\pi\theta_{\lambda/D})}{\pi\theta_{\lambda/D}} \right), \quad (3)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя 1-ого порядка,

$\theta_{\lambda/D}$  – угловое положение внеосевого источника в единицах разрешения телескопа (радиусах Эйри  $1.22 \cdot \lambda/D$ )

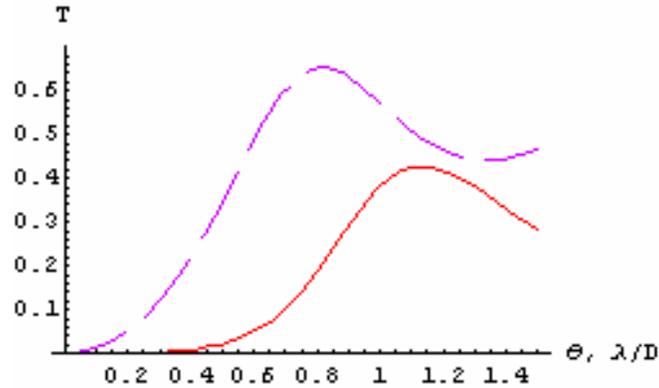
Пропускание тандемного АИК  $T_{танд.}$ :

$$T_{танд.} = 0.25 \left( 1 + \frac{J_1(2\pi\theta_{\lambda/D})}{\pi\theta_{\lambda/D}} - 2 \frac{\sqrt{2}J_1(\sqrt{2}\pi\theta_{\lambda/D})}{\pi\theta_{\lambda/D}} \right) / \left( 1 + \frac{J_1(2\pi\theta_{\lambda/D})}{\pi\theta_{\lambda/D}} + 2 \frac{\sqrt{2}J_1(\sqrt{2}\pi\theta_{\lambda/D})}{\pi\theta_{\lambda/D}} \right). \quad (4)$$

Графики зависимостей (3) и (4) приведены на **Рис. 15.** и показывают ослабление коронографического сигнала в зависимости от углового рассогласования фонового и внеосевого источников. Максимальные пропускания:  $T_{одиноч.} \approx 0.62$  и  $T_{танд.} \approx 0.4$ .

В **Табл. 1.** приведены максимально допустимые ошибки наведения телескопа при работе с одиночным и тандемным АИК. Данные **Табл. 1.** показывают технически достижимые точности углового наведения АИК, выполненного по

схеме тандема двух последовательных интерферометров. Схема одиночного АИК имеет критические требования по точности наведения. Технически при обеспечении точности гидирования телескопа менее 1 угловой секунды, последующая подстройка возможна внутренним наклонным зеркалом, установленном на пьезо-позиционере.



**Рис. 15.** Теоретические графики, показывающие коронографические сигналы:  $T_{одиноч}$  и  $T_{танд.}$ , прошедшие через коронографы в зависимости от угла наклона  $\theta$  к оптической оси. Одиночный АИК – штриховая линия и двойной АИК – сплошная линия.

**Таблица 1.** Максимальные ошибки наведения телескопа.

| Тип АИК       | Коронографический контраст | Ошибка наведения в угл. секундах для телескопа с диаметром главного зеркала $D$ , $\lambda=1$ мкм. |                           |                           |
|---------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
|               |                            | $D=0.4$ м.                                                                                         | $D=0.8$ м.                | $D=1.2$ м.                |
| Одиночный АИК | $10^4$                     | $\approx 5 \cdot 10^{-3}$                                                                          | $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ | $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ |
|               | $10^6$                     | $\approx 5 \cdot 10^{-4}$                                                                          | $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ | $\approx 1 \cdot 10^{-4}$ |
|               | $10^{10}$                  | $\approx 5 \cdot 10^{-6}$                                                                          | $\approx 2 \cdot 10^{-6}$ | $\approx 1 \cdot 10^{-6}$ |
| Двойной АИК   | $10^4$                     | $\approx 5 \cdot 10^{-2}$                                                                          | $\approx 2 \cdot 10^{-2}$ | $\approx 1 \cdot 10^{-2}$ |
|               | $10^6$                     | $\approx 1 \cdot 10^{-2}$                                                                          | $\approx 7 \cdot 10^{-3}$ | $\approx 5 \cdot 10^{-3}$ |
|               | $10^{10}$                  | $\approx 1 \cdot 10^{-3}$                                                                          | $\approx 7 \cdot 10^{-4}$ | $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ |

Другим требованием по точности гидирования является *удержание*, определяемое временем экспозиции слабоконтрастного объекта (экзопланеты) в режиме коронографического наблюдения. Это определяют фотометрия

слабоконтрастного объекта, пропускание коронографа и чувствительность фотоприемника излучения и уровень шума. Приведен пример наблюдения звезды  $\epsilon$ -Эридани, так как эта звезда представляет собой один из наиболее вероятных кандидатов прототипа Солнечной системы [35]. Астрообъект  $\epsilon$ -Эридани имеет магнитуду 1.75 на длине волны  $\lambda=1620$  нм. и эквивалентный световой поток  $\approx 9 \cdot 10^9$  фотонов в секунду. Оценка чувствительности фотоприемного устройства произведена на примере характеристик охлаждаемой ПЗС матрицы (ССД) с низким шумовым сигналом, применяемой в наземном коронографе НИСАО, телескоп «Субару». При ослаблении сигнала осевой компоненты звезды  $\epsilon$ -Эридани на 5 порядков, коронографом на телескопе с диаметром главного зеркала 0.8 м. уровень шумового сигнала не должен превысить ослабленный сигнал экзопланеты и возможно детектирование с общей экспозицией порядка 0.5÷0.8 минут. Поэтому время экспозиции  $\sim 1$  мин. составляет требование по времени экспозиции для удержания объекта измерения внутри угловой ошибки  $\sim 1 \cdot 10^{-2}$  угловых секунд. Пример фотометрического расчета для коронографического наблюдения звезды  $\epsilon$ -Эридани содержится в разделе **4.3.2.**

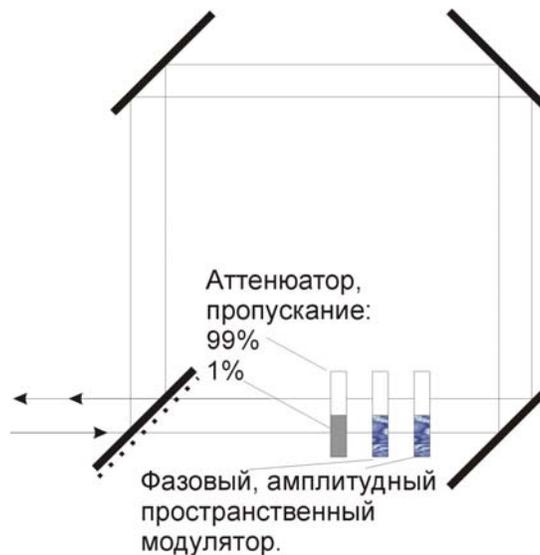
В разд. **4.2.** приведены обобщенные технические требования к информационному потоку передачи данных, которые показывают необходимость телеметрии и возможного потребления электропитания менее 50 Вт.

В разд. **4.3.** приведен метод несбалансированного интерферометра для компенсации дефектов волнового фронта с целью получения коронографического контраста  $10^6$  в ИК спектральной области и контраста  $10^{10}$  в видимом диапазоне длин волн. На входе ноль-интерферометра качество волнового фронта, исходящего от осевого источника – звезды должно иметь допустимое среднеквадратичное отклонение не хуже  $\lambda/1000$  для ИК области и  $\lambda/10000 - \lambda/50000$  для видимой области спектра. Оценка максимальной ошибки волнового фронта на длине волны  $\lambda$  для достижения требуемого интерференционного контраста произведена согласно [36]. Указанные точности  $\lambda/1000 - \lambda/50000$  технически недостижимы модуляционными способами современной адаптивной оптики [37, 38], главным образом, из-за остаточных шероховатостей оптических поверхностей, остаточных деформаций оптических элементов, приводящих к рассеянию, наведенному

двулучепреломлению, фазовой и амплитудной модуляции, из-за эффектов дифракции.

Предложенный метод коррекции волнового фронта [31, Nishikawa J., ... Tavrov A. *et. al.* 2008 *Proc. SPIE*, Kotani T., ... Tavrov A. *et. al.* 2007 *Proc. Lyot conference*] использует *несбалансированный* интерферометр для интерференционного сложения когерентных волн, различных по амплитуде и по фазе. Благодаря использованию двух устройств адаптивной оптики, например двух адаптивных зеркал, существует возможность одновременной коррекции фазы и амплитуды волнового фронта.

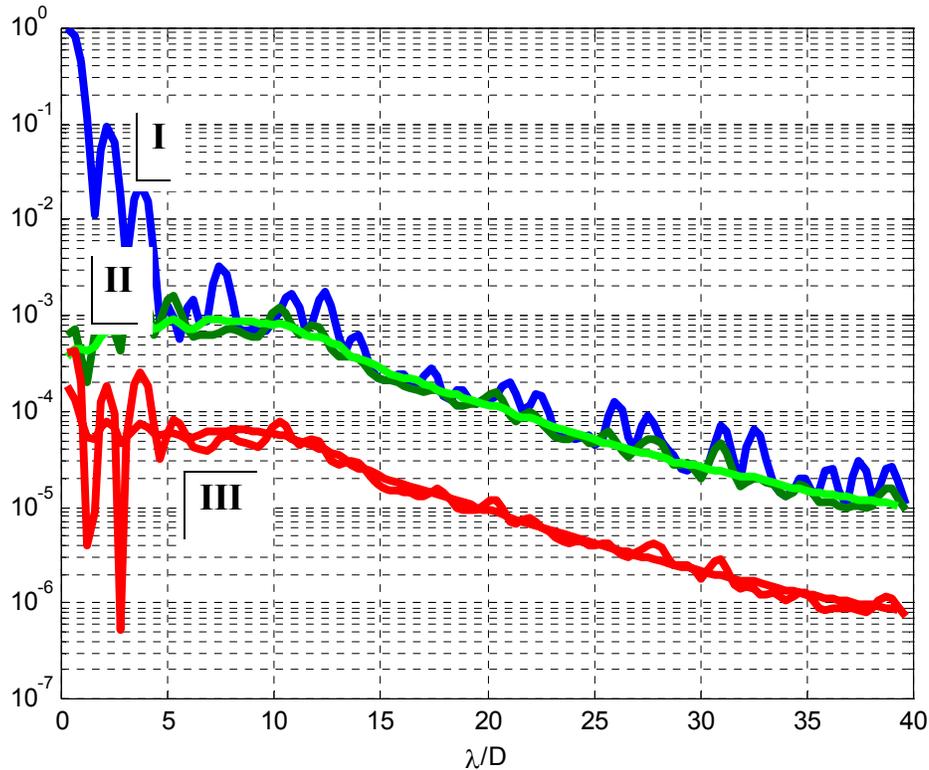
В оптической схеме устройство прецизионной коррекции волнового фронта размещают перед *неидеальным* интерференционным коронографом или обобщенным коронографом, состоящим из реальных оптических элементов, также добавляющих собственные погрешности волнового фронта и амплитуды. Для метода коррекции волнового фронта, предложена кольцевая схема для обеспечения механической стабильности, **Рис. 16.**



**Рис. 16.** Схема модифицированного метода несбалансированного интерферометра для прецизионной модуляции волнового фронта в кольцевом интерферометре с пространственным сдвигом.

В разд. 4.3.2. приведено моделирование компенсации волнового фронта атмосферной турбулентности и пример улучшения контраста в наземном

коронаграфе NICIAO телескопа Субару. В частности, из-за сложности динамической компенсации атмосферной турбулентности расчетные уровни контраста достижимы при *недифракционном* угловом разрешении телескопа  $\sim 20 \cdot \lambda/D$ , **Рис. 17.**, что неэффективно при малых диаметрах телескопа.



**Рис. 17.** Радиальные профили некоронаграфического изображения (I), обычного коронаграфического изображения (II) и коронаграфического изображения в дифференциальном спектральном режиме (III).

В разд. 4.4. приведен пример прецизионного расчета дифракции [39, 40] на примере комбинирования пиксельных устройств управления волновым фронтом с обычными линзами, где учтены осевые и неосевые aberrации и дифракционные эффекты.

**В заключении** подводятся основные итоги работы и сформулированы завершающие **выводы**. Основным итогом работы является создание метода ахроматической интерференционной коронаграфии, с контрастом и характеристиками, достаточными для непосредственного наблюдения экзопланет

Земного типа. Ахроматическая интерференционная коронография дает возможность зарегистрировать свет и изображение слабоконтрастного источника на фоне яркого источника света (звезды), ослабленного по широкому спектральному диапазону пропускания коронографа.

Комплекс интерференционных методов содержит каскад нескольких интерферометров. Создан лабораторный макет – демонстратор, подтвердивший ахроматическое ослабление сигнала осевого сигнала и одновременное пропускание сигнала внеосевого источника света. Выявлены аппаратные ограничивающие факторы и допустимые точности настройки интерферометра, произведена их метрологическая оценка. Теоретически и экспериментально показано решение задачи достижения высокого коронографического контраста  $\sim 10^{10}$  для погашении фонового источника от реального – протяженного источника света, например звезды Солнечного типа, удаленной на расстояние 5 – 10 парсек, имеющей видимый угловой размер  $\sim 10^{-2} \lambda/D$  (фракции диаметра дифракционного диска Эйри). Показан принцип интерференционной прецизионной коррекции волнового фронта в несбалансированном по интенсивности интерферометре.

Разработан, теоретически обоснован, проверен на известных примерах и программно реализован тензорный метод расчета комплексной амплитуды в неплоской оптической системе, когда одновременно изменяются ахроматическая составляющая фазы, обусловленная модуляцией геометрической фазы и хроматическая составляющая, обусловленная динамической (классической) фазой. С применением данного метода расчета найдены практические схемы интерференционных ахроматических коронографов.

Теоретически и экспериментально изучены коронографические характеристики контрастирования поля зрения в схемах одиночного интерферометра и тандема двух интерферометров. Посредством двухлучевого ноль-интерферометра впервые в мире в лабораторном эксперименте достигнут ахроматический коронографический контраст  $10^6$  при угловом рассогласовании осевого и внеосевого источников на уровне первого кольца Эйри ( $1 \cdot \lambda/D$ ). Посредством четырехлучевого интерферометра экспериментально визуализирован профиль синтетической функции когерентности и сравнен с расчетным профилем.

Оценены точности наведения телескопа для астронаблюдения в коронографическом режиме.

Для наземных условий астронаблюдений моделирована система адаптивной оптики телескопа SUBARU. Произведены рабочие оценки длительности экспозиций, эффективности восстановления волнового фронта для реальных условий наблюдения экзопланеты с контрастом  $10^6$ , произведен фотометрический расчет регистрации с реальными шумами фотоприемника, учтены дифференциальные aberrации для режима дифференциального спектрального контраста.

Для учета дифракции посредством трассировки (прослеживания луча) точным методом геометрической оптики разработан и проверен алгоритм прецизионного расчета дифракционных эффектов в линзовой или зеркальной системе, обладающей классическими aberrациями.

Рассмотрены перспективы развития интерферометрии и интерференционной коронографии, предложен новый общий подход к оптическим методам высокого контраста, предложены расширенные применения ноль - интерферометрии.

### Список цитируемой литературы

1. Exoplanet Community Report, ed. P. R. Lawson, W. A. Traub and S. C. Unwin, Jet Propulsion Laboratory, November 2008, California Institute of Technology, Pasadena, California, , p. 78, [www.exep.jpl.nasa.gov/documents/Forum2008\\_268\\_small.pdf](http://www.exep.jpl.nasa.gov/documents/Forum2008_268_small.pdf).
2. R. Dvorak. Extrasolar planets: formation, detection and dynamics. // Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2008. ISBN: 9783527406715 3527406719
3. L. V. Ksanfomality. Search for Extrasolar Planets by Polarimetry. // 2007 Solar System Research, Vol. 41, No. 4, pp. 301–306.
4. J. T. Trauger, W. A. Traub. A laboratory demonstration of the capability to image an Earth-like extrasolar planet. // 2007 Nature vol. 446, pp. 771–773.
5. R. N. Bracewell. Detecting nonsolar planets by spinning infrared interferometer. // 1978 Nature vol. 274, pp. 780–781.
6. Lawson, P. R. ed. Principles of Long Baseline Stellar Interferometry, Course Notes from the 1999 Michelson Summer School, JPL, NASA. von der L`uhe, O. et al. (1994). Amplitude and Spatial Interferometry, II, ed. J. B. Breckenridge, Proc. SPIE, 2200, 168.
7. J. Gay, Y. Rabbia. An interferometric method for coronagraphy. // 1996, C. R. Acad. Sci Paris, vol. 322 Serie II b, p. 265.
8. O. Guyon, F. Roddier. Direct exoplanet imaging possibilities of the nulling stellar coronagraph. // 2000 SPIE Proc. vol. 4006, p. 377.
9. Tyson R. K. Principles of Adaptive Optics. // 1991, San Diego: Academic Press.
10. K. Creath. Phase-measurement interferometry techniques. // 1988 in Progress in Optics, E. Wolf, ed., Elsevier, Amsterdam, vol. XXVI, pp. 349–393.
11. Ю. В. Коломийцев. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. // 1976 Машиностроение, 296 с.
12. M. Berry. Anticipation of the geometric phase. // 1990 Physics Today vol. 43, p. 34.
13. P. Hariharan, K. G. Larkin, M. Roy. The geometric phase: interferometric observations with white light. // 1994 J. Mod. Opt. vol. 41, pp. 663–667.
14. Д. Н. Клышко. Геометрическая фаза Берри в колебательных процессах. // 1993 УФН, том. 163, с. 11.

15. E.J. Galvez. Applications of Geometric Phase in Optics. // 2002 Recent Research Developments in Optics vol. 2, pp. 165-182.
16. Hariharan, K. G. Larkin, M. Roy. The geometric phase: interferometric observations with white light. // 1994 J. Mod. Opt. vol. 41, pp. 663-667.
17. Р. Азаам, Н. Башара, «Эллипсометрия и поляризованный свет.» пер. с англ. 1981 Москва, «Мир», 584 с.
18. A. Laberyrie, S. G. Lipson, P. Nisenson. An Introduction to Optical Stellar Interferometry. // 2006 Cambridge University Press, London, UK, 325 p.
19. Y. Rabbia, J. Gay, J.-P Rivet, J.-L Schneider, «Achromatic Phase Shifters: The "Mirror" Approaches», Proceedings of GENIE - DARWIN Workshop - Hunting for Planets (ESA SP-522). 3-6 June 2002. Leiden, The Netherlands. Editor: H. Lacoste., p.14.1.
20. K. Itoh. Interferometric Multispectral Imaging. // 1996 Progress in Optics vol. XXXV, E. Wolf ed., p. 145.
21. F Roddier, C Roddier, J Demarcq. A rotation shearing interferometer with phase-compensated roof-prisms. //1978 J. Opt. vol. 9, pp. 145-149.
22. M. Strojnik, G. Paez. Comparison of linear and rotationally shearing interferometric layouts for extrasolar planet detection from space. // 2003 Appl. Opt. vol. 42, pp. 5897–5905.
23. E. Serabyn, M. M. Colavita. Fully Symmetric Nulling Beam Combiners. // 2001 Appl. Opt. vol. 40, pp. 1668-1671.
24. P. Hariharan. Interferometers. Handbook of Optics // 1995 M. Bass, McGraw-Hill, New York, p. 102.
25. Guyon O. Phase-induced amplitude apodization of telescope pupils for extrasolar terrestrial planet imaging. // 2003 A&A – Astronomy and Astrophysics. vol. 404, p. 379.
26. P. Baudoz, Y. Rabbia, J. Gay. Achromatic interfero coronagraphy, I. Theoretical capabilities for ground-based observations. // 2000 A&A – Astronomy and Astrophysics. Suppl. Ser. vol. 141, pp. 319-329.
27. Breckinridge J. B. Coherence Interferometer and Astronomical Application // 1972 Applied Optics vol. 11 (12), p.2996.
28. Г. Б. Малыкин. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения. // 2000 УФН, том. 170, вып. 12, с. 1325-1349.

29. P. Baudoz, A. Boccaletti, Y. Rabbia, J. Gay. Stellar coronagraphy: study and test of a hybrid interfero-coronagraph. // 2005 PASP- Publ. Astron. Soc. Pac. vol. 117, pp. 1004–1011.
30. W. Singer, M. Totzeck, H. Gross. Handbook of Optical Systems, Vol. 2, Physical Image Formation. // 2005 ISBN 3-527-40378-7. Wiley-VCH, p. 714.
31. J. Nishikawa, N. Murakami, L. Abe, T. Kotani, M. Tamurab, K. Yokochi, T. Kurokawa. Nulling and adaptive optics for very high dynamic range coronagraph. // 2006 Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter, edited by John C. Mather, Howard A. MacEwen, Mattheus W.M. de Graauw, Proc. of SPIE vol. 6265, p. 53.
32. Hardy, J. W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. // 1998 New York: Oxford University Press, 564 p.
33. Green, J. J., S. A. Basinger, A. Scott et al. 2003 Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets ed. Daniel R. Coulter, Proc. SPIE, 5170, 38.
34. B. Biller, L. Close, R. Lenzen, W. Brandner, D. McCarthy, E. Nielsen, M. Hartung. Suppressing Speckle Noise for Simultaneous Differential Extrasolar Planet Imaging (SDI) at the VLT and MMT. // 2004 Advancements in Adaptive Optics. ed. by D. B. Calia, B. L. Ellerbroek, and R. Ragazzoni, Proc. of the SPIE, vol. 5490, pp. 389-397.
35. G. F. Benrdict, B. E. McArthur, G. Gatewood, E. Nelan, W. D. Cochran, A. Hatzes, M. Ende, R. Wittenmyer, S. L. Baliunas, G. A. Walker, S. Yang, M. Kurster, S. Els, D. Paulson. The Extrasolar planet  $\epsilon$  Eridani b: Orbit and Mass. // 2006 Astronomical Journal, vol. 132, pp. 2206-2218.
36. W. Traub. Beam Combination and Fringe Measurement. // Ch. 3 in Principles of Long Baseline Stellar Interferometry, ed. by P. Lawson, Michelson Fellowship Program, 1999, JPL Publication 00-009 07/00, <http://sim.jpl.nasa.gov/michelson/iss.html>.
37. E. L. Lago, R. de la Fuent. // 2008 Applied Optics vol. 47, p. 372.
38. L. Pueyo, M. G. Littman, J. Kasdin, R. Vanderbei, R. Belikov, A. Give'on. // 2005 Proc. SPIE vol. 5903, p. 59030L.
39. H. Gross, H. Zügge, M. Peschka, F. Blechinger. Handbook of optical systems,” Volume 3, Aberration Theory and Correction of Optical Systems. // 2007 ISBN: 978-3-527-40379-0, 780 pages.

40. Frank Wyrowski, Jari Turunen. Progress in Photon Management. // 2005 ISBN 3-527-40390-6. Wiley-VCH, pp. 250.

### Список основных публикаций по теме диссертации

Андреев В., **Тавров А.**, Ублинский Д., Орлов Д., Коган К., Топологические фазы Рытова-Владимирского и дислокации волнового фронта. // Труды Физического Института им. П. Н. Лебедева. 1996, 3-4, С.44-52.

**Tavrov A.**, Takeda M., Miyamoto Y., Kawabata T., Andreev V., A method to evaluate the geometrical spin-redirection phase for a non-planar ray. // Journal of Opt. Soc. Am. (JOSA) 1999. vol. A. 16, 4, pp. 919-921.

**Tavrov A.**, Takeda M., Miyamoto Y., Kawabata T., Andreev V., Generalised algorithm for the unified analysis and simultaneous evaluation of geometrical spin-redirection phase and Pancharatnam phase in a complex Interferometer system. // Journal of Opt. Soc. Am. (JOSA). 2000. vol. A. 17, (1), pp. 154-161.

**Tavrov A.**, Takeda M., Miyamoto Y., Kawabata T., Andreev V., Interferometric microimaging based on geometrical spin-redirection phase. // Optics Letters. 2000. vol . 25, (7), pp. 460-462.

Andreev, V. A. Indukaev, K. V. **Tavrov, A. V.**, Topological phases and interpretation of the interferometer measurements,” Bulletin Lebedev Physics Institute Kratkie Soobsheniya po Fizike, 2001, part 10, p. 7-17.

**Tavrov A.**, Totzeck M., Kerwien N., Tiziani H., RCWA calculus of sub-micrometer interference pattern and resolving edge position versus signal-to-noise ratio. // Optical Engineering 2002. vol. 41, p. 1886-1892.

**Tavrov A.**, Totzeck M., Bohr R., Tiziani H., Takeda M., Achromatic nulling interferometer by means of geometric spin-redirection phase. // Optics Letters 2002. vol. 27, pp. 2070-2072.

Schmit, Jo., **Tavrov A.**, Kerwien N., Osten W., Tiziani H., Diffraction induced coherence levels. // Applied Optics 2005. vol. 44, pp. 2202-2212.

**Tavrov A.**, Kobayashi Y., Tanaka Y., Shioda T., Otani Y., Kurokawa T., Takeda M., Common-path achromatic interferometer-coronagraph: nulling of polychromatic light. // Optics Letters 2005. vol. 30, pp. 2224-2226.

**Tavrov A.**, Yokochi K., Abe L., Nishikawa Ju., Tamura M., Kurokawa T., Takeda M., Common-path achromatic interferometer-coronagraph: images from breadboard demonstrator. // Applied Optics 2007. vol. 46, pp. 6885-6895.

**Tavrov A.**, Yokochi K., Nishikawa Ju., Kurokawa T., Takeda M., Achromatic interfero-coronagraph with two common-path interferometers in tandem. // Applied Optics 2008. vol. 47, pp. 4915-4926.

**Тавров А. В.** Физические основы ахроматической ноль интерферометрии для звездной коронографии. Журнал Экспериментальной и Технической Физики (ЖЭТФ). 2008. том 134, выпуск 6(12) с. 1103-1114.

**Tavrov A.** Physical Foundations of Achromatic Nulling Interferometry for Stellar Coronagraphy. // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2008, Vol. 107, No. 6, pp. 942–951.

**Тавров А. В.** Увеличение пространственной когерентности протяженного источника в последовательных интерферометрах вращательного сдвига для ахроматической звездной коронографии. // Журнал Экспериментальной и Технической Физики (ЖЭТФ) 2009, том 135, выпуск 6(12) с. 1109-1124.

**Tavrov A.** Development of Spatial Coherence from an Extended Source in Successive Rotational Shearing Interferometers for Achromatic Stellar Coronagraphy. // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2009, Vol. 108, No. 6, pp. 963–976.

Yokochi K., **Tavrov A.**, Nishikawa Ju., Murakami N., Abe L., Tamura M., Takeda M., Kurokawa T., Achromatic deep nulling with three-dimensional Sagnac interferometer,” Optics Letters. 2009. in print.

**Тавров А. В.** Технические принципы ахроматической интерферометрии для звездной коронографии. // Журнал Технической Физики. 2009, в печати.

**Тавров А. В.**, Мазалов И. Н., Ублинский Д. В., Коган К. А., Андреев В. А., Индукаев К. В., Музафаров В. М. Метод визуализации микроконтрастных объектов. // 1994. Патент РФ N 94016884/2029976 (23.05.94/28.02.95).

**Тавров А. В.** Ахроматический интерференционный коронограф. 2009. // Заявка на патент РФ. от 25.06.2009 N 033502/2009124185.

**Tavrov A.**, Miyamoto Y., Kawabata T., Takeda M., Andreev V., Visualisation of Berry spin-redirected phase in polarization interferometer with geometric shear. // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering ISSN 0277-786X, 2000, vol. 4101, pp. 12-20.

Totzeck, M.; **Tavrov, A.**; Kerwien, N.; Tiziani, H.J. Inspection of sub-wavelength structures and zero-order gratings using polarization interferometry. // Interferometry XI: Techniques and Analysis, Katherine Creath; Joanna Schmit; Eds. Proc. SPIE Vol. 4777 , pp. 330-344, 2002.

Tavrov A. V., Kerwien N., Totzeck M., **Tavrov A.**, Tiziani, H.J. Hochauflösender quantitativer Nomarski Interferenzkontrast mit Polarisationskorrektur. // 103. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) Innsbruck , 2002

Totzeck, M.; Kerwien, N.; **Tavrov, A.**; Tiziani, H.J. DUV-Mikroskopie: Mehr als nur eine Wellenlängenskalierung // 103. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) Innsbruck , 2002.

Kerwien, N.; **Tavrov, A.**; Kauffmann, J.; Osten, W.; Tiziani, H.J. Rapid quantitative phase imaging using phase retrieval for optical metrology of phase-shifting masks, // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, W. Osten, K. Creath, M. Kujawinska Proc. SPIE, Vol 5144 , pp. 105-114, 2003.

**Tavrov A.**, Kerwien N., Berger R., Tiziani H. J., Totzeck M., Spektor B., Shamir Jo., Toker G., Brunfeld A., .Vector simulations of dark beam interaction with nanoscale surface features. // Proc. SPIE Vol. 5144, p. 26-36, Optical Measurement Systems for

Industrial Inspection III; Wolfgang Osten, Malgorzata Kujawinska, Katherine Creath; Eds. May 2003.

**Tavrov A.**, High-resolution optical interferometry. // Seminar of COE. The TUAT, Tokyo, Tech Abstr. Jul. 2003. p. 39-40

**Tavrov A.**, Interferometry with geometric phase: achromatic nulling interferometer”, Seminar of Research group on Lightwave Synthesis. Tokyo, OSJ. Tech Abstr. Nov. 2003 p. 14-17.

**Tavrov A.**, Tanaka Y., Shioda T., Kurokawa T., Takeda M. Achromatic coronagraph based on out-of-plane common-path nulling interferometer. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 5491, 824 (2004).

**Tavrov A.**, Kurokawa T., Takeda M., Achromatic pi-phase Shift for Nano-sensing Interferometry: Nulling of Polychromatic On-axial Light, Off-axial Light Detection. // IQEC and CLEO-PR 2005, Japan, July 15, 2005.

**Tavrov A.**, Otani Y., Kurokawa T., Takeda M., 3D common-path interferometer: achromatic nulling of on-axial light. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 5905, 59051A (2005).

**Tavrov A.**, Otani Y., Kurokawa T., Takeda M., Three-dimensional common-path interferometer for AIC: nulling of polychromatic light. // Direct Imaging of Exoplanets: Science & Techniques. Proceedings of the IAU Colloquium 200, Edited by C. Aime and F. Vakili. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006., pp.451-456.

Nishikawa, Ju., Sato, Y., Muarkami, N., Baba, N., **Tavrov, A.**, Yokochi, K., Kurokawa, T., Takeda, M., // Recent Coronagraph Experimental Studies, NASA Technical Reports Server (NTRS 2006),  
[http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/Coronagraph\\_PDFs/CWP2006\\_16\\_Nishikawa\\_pp86-89.pdf](http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/Coronagraph_PDFs/CWP2006_16_Nishikawa_pp86-89.pdf)

**Tavrov A.**, Nishikawa J., Tamura M., Yokochi K., Kurokawa T., Takeda M., Common-path achromatic nulling interferometer for star coronagraphy: demonstrator and images on breadboard. //Tech. Abstract. Optics and Photonics of Japan OPJ 2006.

Kaito Y., Nishikawa Ju., Murakami N., Abe L., Kotani T., Tamura M., Kurokawa T., **Tavrov A.**, Takeda M., Precise wavefront correction with unbalanced nulling interferometer for direct detection of exo-planet. // Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim, 2007. CLEO/Pacific Rim 2007. Conference on Publication Date: 26-31 Aug. 2007, Seoul, South Korea, ISBN: 978-1-4244-1174-0.

Tamura, M.; Hodapp, K.; Suzuki, R.; Abe, L.; Takami, H.; Suto, H.; Guyon, O.; Kandori, R.; Morino, J.; Hashimoto, J.; Stahlberger, V.; Jacobson, S.; Yamada, H.; Shelton, R.; **Tavrov, A.**; Murakami, N.; Nishikawa, J.; Hayashi, M.; Usuda, T.; Yamada, T.; Nishimura, T., HiCIAO and Exoplanet/Disk Searches on Subaru // Proceedings of the conference In the Spirit of Bernard Lyot: The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century. June 04 - 08, 2007. University of California, Berkeley, CA, USA. Edited by Paul Kalas.

Kotani, T.; Abe, L.; Tamura, M.; Kurokawa, T.; **Tavrov, A.**; Takeda, M., Low Speckle Noise Coronagraph with UNI+PAC. // Proceedings of the conference In the Spirit of Bernard Lyot: The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century. June 04 - 08, 2007. University of California, Berkeley, CA, USA. Edited by Paul Kalas.

**Tavrov A.V.** Spatial Resolution of Modern Interference Methods: Microscopy, Flow, 3D Objects. // Оптические методы исследования потоков 2007 Москва, 26 – 29 июня 2007, Труды конференции с. 170-173.

**Tavrov A.V.**, Nishikawa J., Tamura M., Abe L., Yokochi K., Kurokawa T., Takeda M. Common-Path Achromatic Nulling Interferometer-Coronagraph: Images From a Breadboard Demonstrator. // Оптические методы исследования потоков 2007 Москва, 26 – 29 июня 2007, Труды конференции с. 174-176.

Kotani T., Nishikawa J., Yokochi K., Murakami N., Abe L., Tamura M., Kurokawa T., **Tavrov A.**, Takeda M. Low speckle noise coronagraph with UNI+PAC. // 2007 Proc. of Lyot conference. [http://astro.berkeley.edu/~kalas/lyot2007/Presentations/Kotani\\_Takayuki\\_poster2.pdf](http://astro.berkeley.edu/~kalas/lyot2007/Presentations/Kotani_Takayuki_poster2.pdf)

Nishikawa J., Yokochi K., Abe L., Murakami N., Kotani T., Tamura M., Kurokawa T., **Tavrov A.**, Takeda M., Virtual wavefront compensation and speckle reduction in coronagraph by unbalanced nulling interferometer (UNI) and phase and amplitude correction (PAC). // Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. Edited by Oschmann, Jacobus M., Jr.; de Graauw, Mattheus W. M.; MacEwen, Howard A. Proceedings of the SPIE, Vol. 7010, pp. 70102A-70102A-5 (2008).

Yokochi, K., **Tavrov, A.V.**, Nishikawa, J., Abe, L., Tamura, M., Takeda, M.; Kurokawa, T. Achromatic characteristics in 3-D Sagnac interferometer based on geometric phase shift. // Lasers and Electro-Optics, 2008 and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science. CLEO/QELS 2008. Volume , Issue, 4-9 May 2008, Page(s):1 – 2

**Tavrov A.V.**, Nishikawa J., Tamura M., Yokochi K., Kurokawa T., Takeda M. Deep Nulling by Double Common-path Achromatic Interferometer. // March 2008 Proceeding of the conference JTPF-zodi-c, p. 10 zodi.c.u-tokyo.ac.jp/ESP/WS200803/0-abstract/A\_Tavrov.pdf.

Yokochi K., Murakami N., Nishikawa Ju., Abe L., Kotani T., Tamura M., **Tavrov A.**, Takeda M., Kurokawa T., High dynamic range optical system with accurate wavefront correction for direct detection of exo-planet, // BUNRUI-3, Japan, Tech Abst., March 2008, p. 4.

Hodapp, K. W., Suzuki R., Tamura M., Abe L., Suto H., Kandori R., Morino Ju., Nishimura T., Takami H., Guyon O., Jacobson S., Stahlberger V., Yamada H., Shelton R., Hashimoto Ju., **Tavrov A.**, Nishikawa Ju., Ukita N., Izumiura H., Hayashi M., Nakajima T., Yamada T., Usuda M. HiCIAO: the Subaru Telescope's new high-contrast coronagraphic imager for adaptive optics. // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II. Edited by McLean, Ian S.; Casali, Mark M. Proceedings of the SPIE, Vol. 7014, pp. 701419-701419-12 (2008).

**Тавров А.В.**, Кораблев О.И., Родин А.В., Орлов Д.А., Физические принципы и области применения ахроматической ноль-интерферометрии. // Оптические методы

исследования потоков 2009 Москва, 23 – 26 июня 2009, Труды конференции с. 152-155.