

УДК 523

ТЕСТИРОВАНИЕ ЗВЕЗДНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОРОНОГРАФА В СОСТАВЕ НАЗЕМНОГО ТЕЛЕСКОПА

© 2021 г. А. В. Юдаев^{a, *}, О. Я. Яковлев^{b, c}, А. В. Киселев^{a, c}, В. В. Барке^c, А. А. Венкстерн^c,
И. А. Шашкова^c, А. В. Тавров^{a, b, c}

^aМосковский физико-технический институт ГУ, Москва, Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^cИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: yudaev@phystech.edu

Поступила в редакцию 28.10.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 15.02.2021 г.

Метод прямого наблюдения экзопланет (*direct exoplanet imaging*) с помощью звездного коронографа увеличивает контраст изображения в дифракционной окрестности звезды. Недостаточное уменьшение фона звезды происходит вследствие требуемого качества волнового фронта, превосходящего возможности современных оптических и астрономических систем. В работе оценены достижимые коронографические контрасты для наземного и внеатмосферного телескопов без применения адаптивной оптики (АО) и в дальнейшем запланировано применение устройств АО: наклонного зеркала и *пиксельной* АО для коррекции зональной ошибки. Для практического тестирования перспективной многоконтурной системы телескопа с активной оптикой, корректирующей ВФ, мы построили коронограф с малой апертурой телескопа, позволяющей наблюдать эффект коронографического ослабления звезды. Последнее важно для отработки прецизионного ведения (гидирования) звезды автоматизированным параллактическим приводом телескопа для построения практической циклограммы работы устройств адаптивной оптики. Оценены ошибки волнового фронта внутри интерференционного коронографа, начаты эксперименты, получено удержание линии визирования.

Ключевые слова: звездный коронограф, высококонтрастное астрономическое изображение, ноль интерферометр, метод прямого наблюдения экзопланет

DOI: 10.31857/S0320930X21030105

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно о существовании более 4000 экзопланет — внесолнечных планет, обращающихся по орбитам вокруг родительских звезд (*от англ.* host (parent) star). Подавляющее большинство планет, 99% (<http://www.exoplanet.eu>), открыты непрямыми методами обнаружения: спектроскопическим измерением лучевых скоростей родительских звезд (измерением их Кеплеровской скорости при движении вокруг барицентра планетной системы), фотометрическим методом измерения транзита, фотометрией события микролинзирования, таймингом пульсаров, астрометрическим методом (Peruyman, 2018).

Непрямые методы детектирования экзопланет¹ не содержат спектральную информацию об атмосфере планеты. Даже в перспективе развития

эти методы исследования экзопланет не позволят сделать обоснованный вывод об обитаемости планеты. Непосредственное наблюдение экзопланет возможно осуществить, совершенствуя метод получения прямого изображения экзопланеты (*от англ.* (exoplanet) direct imaging), увеличивая контраст наблюдения слабого *компаньона* в дифракционной окрестности звезды — на фоне света, рассеянного звездой.

При наблюдении на телескопе метрового класса модельных Солнца и Земли, удаленных на расстояние 5–10 пк, видимое угловое расстояние между звездой и планетой, так называемое стеллоцентрическое расстояние, (*от англ.* stellocentric distance), составляет 1–5 дифракционных радиусов ($1.22 \times \lambda/D \approx \lambda/D$ — колец Эйри, где λ — центральная длина волны оптического излучения (в видимом диапазоне обычно ≈ 500 нм) и D — диаметр апертуры телескопа ($D \approx 1$ –2 м)). В перспективе метод прямого наблюдения экзопланет будет иметь возможность оценить яркостную тем-

¹ За исключением спектрофотометрии транзита, но приблизительно 99% долгопериодических экзопланет не находятся для земного наблюдателя в транзитной конфигурации.

пературу, цветовые альбедо, наличие облаков, газовый состав атмосферы и другие свойства планеты. В настоящее время непосредственное наблюдение экзопланет сопряжено с рядом технологических трудностей. Причина этого — большое различие в световых потоках от звезды и планеты при предельно малом угловом расстоянии между ними. Для родительской звезды солнечного типа, находящейся на расстоянии 10 пк от наблюдателя, юпитероподобные и землеподобные экзопланеты имеют разницу в видимом диапазоне длин волн в яркостях между планетой и звездой в 9–10 порядков, а видимые угловые расстояния — 0.5" и 0.1" соответственно (Frolov и др., 2015). При указанной разнице в яркостях источников, слабый источник (планета) не регистрируется существующими фото-приемными устройствами (ФПУ) на фоне яркого источника из-за недостаточного динамического диапазона современных ФПУ, составляющем не более 4–5 порядков (Howell, 2012). В таком случае, даже с использованием последующей математической обработки изображений, не удастся зарегистрировать сигнал слабого источника.

Для снижения яркости фонового источника — звезды в регистрируемом изображении традиционно используют звездный коронограф. В случае идеального (безабберационного) изображения при помощи коронографа, фон яркого осевого источника (звезды) устраняют или значительно ослабляют, так что регистрация слабого источника современными ФПУ становится возможна. В настоящее время предложены различные модификации и принципы звездного коронографа (Guyon, 2006). Например, в основе астрономического инструмента — масочного звездного коронографа Лио (*от англ. stellar Lyot coronagraph*), находится маска (окуляр — *от англ. occulter*), установленная в фокальной плоскости телескопа (внутренний коронограф — *от англ. inner coronagraph*) или маска, вынесенная на значительное расстояние перед телескопом (более 10^5 км, коронограф с вынесенной маской — *от англ. external occulter* (Cash и др., 2007)). Также обязательным элементом масочного Лио коронографа является фильтр Лио, устанавливаемый в зрачковой плоскости, обычно во вторичном зрачке для ослабления света, дифрагированного или рассеянного краями фокальной маски. Широко распространено использование методов аподизации зрачка, которые сглаживают апертурный край оптической системы и тем самым изменяют аппаратную (частотную) функцию телескопа.

Использование аподизации, Лио фильтра и фокальных фазовых масок ограничивают рабочий спектральный диапазон коронографа. Так как аподизацию оптимизируют на центральную длину волны, соседняя длина волны имеет уже приблизительное решение. Также фазовые маски —

хроматичны. С целью их ахроматизации, описаны поляризационные маски, например, (Mawet и др., 2010). Очевидно, что для получения наибольшего по интенсивности сигнала слабого источника, метод прямого наблюдения экзопланеты существенно выигрывает, если коронограф — ахроматичный. Например, планета Земля на удалении 10 пк имеет светимость, равную 29 звездным величинам, что равно световому потоку приблизительно 0.5 фотонов/(m^2 с) при 10% спектральной ширине в диапазоне видимого света (Traub и др., 2010).

Для ахроматизации звездного коронографа предложены интерференционные методы (Vaudoz и др., 2000; Lyon и др., 2005; Tavrov и др., 2005) погашения фонового осевого источника света.

Перспективным интерференционным методом является метод ноль-интерферометра вращательного сдвига (*от англ. rotational shear interferometer*) с общим оптическим путем для обеспечения механической стабильности конструкции и сдвигом вращательного типа для достижения максимального пропускания в отсутствие экранирования зрачка. Данная разработка прошла испытания в лабораторных условиях, где была показана ее функциональность в качестве ахроматического коронографа (Frolov и др., 2016; Tavrov и др., 2018). Затемнение изображения звезды в интерференционном коронографе возникает в результате деструктивной интерференции (с ахроматической противофазой), и повернутые на определенный угол (вращательный сдвиг относительно оптической оси в центре апертуры) копии изображения звезды ослабляются. Центральные (осевые) области с радиусом λ/D , соответствующие изображению звезды, геометрически накладываются друг на друга и погашаются в результате интерференции. Однако нецентральные области изображения, т.е. предполагаемые области поиска экзопланет, за счет вращательного сдвига геометрически разделены и не совмещены, так что погашения и существенного ослабления не происходит.

В общем, для внутреннего коронографа (коронограф, маска или интерферометр находятся после телескопа) качество апертуры (ровный край, тонкий спайдер (*от англ. spider* — держатель вторичного зеркала)) и, главным образом, минимальные ошибки волнового фронта являются определяющими факторами для достижения высокого коронографического контраста.

Волновой фронт, прошедший через турбулентную атмосферу Земли и регистрируемый телескопом, не имеет требуемого для работы коронографа оптического качества. При астроклимате с достаточно хорошим сиингом (*от англ. seeing*) ~1 угл. с, волновой фронт на метровой апертуре телескопа содержит искажения волнового фрон-

та, превышающие длину волны видимого света более чем в несколько раз. При детальном рассмотрении, волновой фронт состоит из перекрывающихся областей с характерным размером (*радиусом*) Фрида, внутри которых искажения волнового фронта не хуже $\lambda = 2\pi$ (т.е. искажения по фазе находятся внутри одной интерференционной полосы). Для хорошего астроклимата сиинг $\approx 1''$ и параметр Фрида составляет около 10–15 см для видимого диапазона длин волн. Поэтому практически возможно получить невысокий коронографический контраст, порядка 10^3 , на небольшой апертуре порядка 10 мм, что на порядок меньше параметра Фрида.

Если апертура телескопа меньше диаметра Фрида, который характеризует состояние атмосферы в момент наблюдения, то атмосферные искажения будут вносить основной вклад в первые члены разложения волнового фронта по полиномам Цернике – а именно вызывать, главным образом, наклон ВФ, что соответствует отклонению направления визирования на звезду от инструментальной оси коронографа. (Коронограф ослабляет свет от звезды наилучшим образом при совмещении его инструментальной оси и направления на звезду). В этом случае скомпенсировать наклон фронта возможно управляемым наклонным зеркалом (*от англ. tip-tilt mirror*). Направление на звезду приводят к инструментальной оси коронографа, относительно которой происходит инструментальное дифференцированное ослабление осевого источника.

В (Golimowski и др., 1992) были опубликованы результаты натуральных астрономических наблюдений с использованием Лию коронографа и малой субапертуры телескопа (≈ 4 диаметров Фрида) без *пиксельной* коррекции (например, с помощью деформируемого зеркала) атмосферных аберраций, но с коррекцией наклона волнового фронта. В результате было получено затемнение в 6 раз (~ 2 зв. вел.) лучше, чем коронографическое затемнение без коррекции наклона. В натуральных испытаниях мы ожидаем похожих значений затемнения света родительской звезды в эксперименте.

Коронограф на телескопе с малой апертурой решает ряд технологических задач. В частности, эксперименты с ним имеют следующие цели:

- исследовать динамические характеристики и практические возможности гидирования,
- проверить точность удержания линии визирования телескопа на звезду с разными углами восхождения,
- экспериментально при наблюдении звезды подтвердить ослабление осевого источника, находящегося на инструментальной оси коронографа,
- разработать процедуру удержания фотоцентра звезды на заданном пикселе ПЗС матрицы с активной обратной связью, управляющей приво-

дами механизированной экваториальной монтировки телескопа, наклонным зеркалом и третьим контуром, содержащим в перспективе пиксельный корректор ВФ.

В качестве прецизионного корректора наклона мы используем управляемое наклонное зеркало (*англ. tip-tilt mirror*) на трех пьезоактуаторах – наклонной платформе “трипод” с диапазоном наклона $\sim 1000''$, имеющие точность не хуже $0.1''$.

В дальнейшем, апертуру телескопа предполагается последовательно увеличивать, в этом случае для коррекции волнового фронта предполагается использовать *пиксельное* устройство адаптивной оптики, аналогично адаптивному зеркалу (*от англ. deformable mirror DM*) или пространственному ЖК модулятору света (*от англ. spatial light modulator SLM*).

Для перечисленных задач натурального эксперимента был спроектирован и сконструирован миниатюрный коронограф с апертурой 8 мм в составе малого телескопа и установлен на экваториальную гидирующую монтировку. В рамках поставленных целей, в настоящей работе описаны тестовые измерения на интерференционном коронографе, приведены и обсуждаются теоретические, модельные, конструктивные и технические особенности функционирования коронографа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОНОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрим дифракционные изображения звезды и планеты как пространственно-разрешенных источников, осевого и неосевого – соответственно, полученные в результате моделирования. Моделирование производили в среде MatLab® в программном пакете Proper (<http://proper-library.sourceforge.net>).

Для наблюдений экзопланет, необходимо ослабить дифракционный фон звезды, “классически” наблюдаемый в форме дифракционных колец (вторичных максимумов – “лепестко” ФРТ). Также следует учесть искажения ФРТ, вызванные рассеянным светом на аберрациях оптической системы телескопа и микро-шероховатости поверхностей оптических элементов, главным образом, главного и вторичного зеркал. Обусловленные несовершенством оптики, эти искажения (квазипостоянная интенсивность без четко проявленной кольцевой структуры) содержатся в изображении ФРТ в качестве увеличенного фона звезды. В случае наземного телескопа, существенно большим искажающим фактором становится рассеивающий турбулентный атмосферный экран. Вначале моделирование проводилось без учета влияния атмосферы, на примере космического телескопа. В качестве примера на рис. 1. показаны четыре ФРТ, соответствующие следую-

щим моделям: (1) – звезде (осевому источнику), наблюдаемой на идеальном (безабберационном) зеркальном телескопе (Ричи-Кретьена) с апертурами главного и вторичного зеркал 1.7 и 0.6 м соответственно; (2) – случаю (1), но телескоп имеет оптические aberrации с коэффициентами разложения по полиномам Цернике $\{0; 0; 0; 0.02; -0.033; 0.045; 0.003; -0.009; 0.006; 0.003; 0.009; 0.006; -0.001; -0.008; 0.002\}$, нормированными на длину волны λ , для первых 15 aberrаций, что суммарно привело к отклонению от плоского волнового фронта в зрачке телескопа на величины $\sim \lambda/10$ p-v (при $\lambda = 500$ нм) (рис. 1а) и $\sim \lambda$ p-v (рис. 1б), которые задавали дополнительным коэффициентом. Первые три коэффициента разложения по Цернике были равны нулю, что соответствует нулевым параллельному сдвигу ВФ и наклонам по x и по y , соответственно.

Дополнительно учтена смоделированная микро-шероховатость оптических поверхностей зеркал со среднеквадратичным отклонением – $RMS = 2$ нм, а убывание функции ошибок поверхности – спектральной мощности (от англ. power spectral density – PSD) в сторону высоких пространственных частот соответствует степенному закону с показателем степени $-11/3$; (3) планете, как неосевому источнику, наблюдаемому на $3 \lambda/D$ стеллоцентрическом расстоянии телескопом с aberrациями и с шероховатостью как в случае (2), планета имеет световой поток на 10^{10} меньше потока от звезды, что показано в логарифмическом масштабе светового потока (вертикальная ось); (4) коронографическому изображению звезды (зрачок и его копия повернуты на 180°), если телескоп имел aberrации и микро-шероховатость как в случае (2); (5) коронографическому изображению звезды (зрачок и его копия повернуты на 5°), если телескоп соответствует случаю (2).

В качестве коронографа моделировали интерференционный коронограф. Интенсивность I на выходе интерференционного коронографа вычисляли следующим образом: ФРТ (2) переворачивают на угол вращательного сдвига (180° или 5°), формируя I_2 , и затем складывают в противофазе с неперевернутой ФРТ (2) – I_1 . Далее в каждом пикселе изображения, вычисления производились, согласно элементарному закону интерференции двух скалярных волн в противофазе:

$$I = I_1 I_1 + I_2 I_2 - 2 I_1 I_2, \quad (1)$$

ФРТ (2) показана в форме сечения, которое получено усреднением сечений по азимуту. рис. 1 показывает, в частности, что вследствие ненулевых классических aberrаций и рассеяния на микро-шероховатости поверхности, яркий осевой источник – звезда, рассеивается и соответствующая ФРТ (2) имеет нарушенную структуру колец Эйри. В области высоких пространственных ча-

стот, начиная приблизительно с пятого кольца Эйри, картина ФРТ (2) содержит, главным образом рассеянное излучение. Вследствие этого, интерференционный коронограф не может существенно ослабить осевой источник: коронографическая ФРТ (4) для ИВС 180° показывает ослабление фона приблизительно на два порядка; коронографическая ФРТ (5) для ИВС 5° показывает ослабление приблизительно на 4.5 порядка.

При моделируемом на рис. 1а качестве телескопа искажения ВФ в зрачке менее $\lambda/10$ p-v, в коронографических изображениях ФРТ (4) и (5) уровень дифрагированного (рассеянного) фона излучения звезды снижается относительно некоуронографической ФРТ (2). На стеллоцентрическом расстоянии ($3\lambda/D$), соответствующем местоположению планеты ФРТ (3) (в точке максимума) дифракционный фон звезды остается на 4–5 порядков превышающим ФРТ планеты (3). При качестве телескопа (рис. 1а) для коронографа ИВС 180° уровень фона превышает динамический диапазон фото-приемного устройства, так что применения известных дифференциальных методов обработки коронографического изображения (англ. ADI – angular differential imaging, SDI – spectral differential imaging, PDI – polarization differential imaging, (Perryman, 2018)), к сожалению, не проявит изображение планеты на дифракционном фоне звезды. В то же время при этом качестве телескопа (рис. 1а) для коронографа ИВС 5° для фоторегистрации требуется динамический диапазон 10^4 , что может быть достижимо на пределе функционирования астрономических ПЗС. К сожалению, оптическое качество космического телескопа метрового класса $\lambda/10$ p-v пока технологически недостижимо. Более реалистичное качество телескопа $\sim \lambda$ p-v, см. рис. 1б, который показывает оценки коронографического контраста для этого случая. Таким образом, для решения задачи наблюдения экзопланеты требуется лучшая оптическое качество телескопа или дополнительная коррекция волнового фронта.

На примере моделирования космического телескопа (рис. 1), полезно указать на существенное различие следующих величин: C_D – уровня ослабления света звезды интегрально по всей плоскости изображения (или по полному зрачку оптической системы) и интегрально по небольшой области изображения диаметром $d \sim 2\lambda/D$ (например от 2 до 4 λ/D), сцентрированной относительно максимума ФРТ планеты (на $3 \lambda/D$) – $C_d = 2\lambda/D @ 3\lambda/D$. Эти величины различаются более чем на порядок и в приведенном примере рис. 1 (а) для ИВС 180° интегральные величины вдоль зависимостей (2) и (4), соответственно равны $C_D \approx 90$, $C_d = 2\lambda/D @ 3\lambda/D \approx 6.7$ и их отношение $C_D/C_d = 2\lambda/D @ 3\lambda/D \approx 14$.

Стандартным методом получения более высокого коронографического контраста C_d при суще-

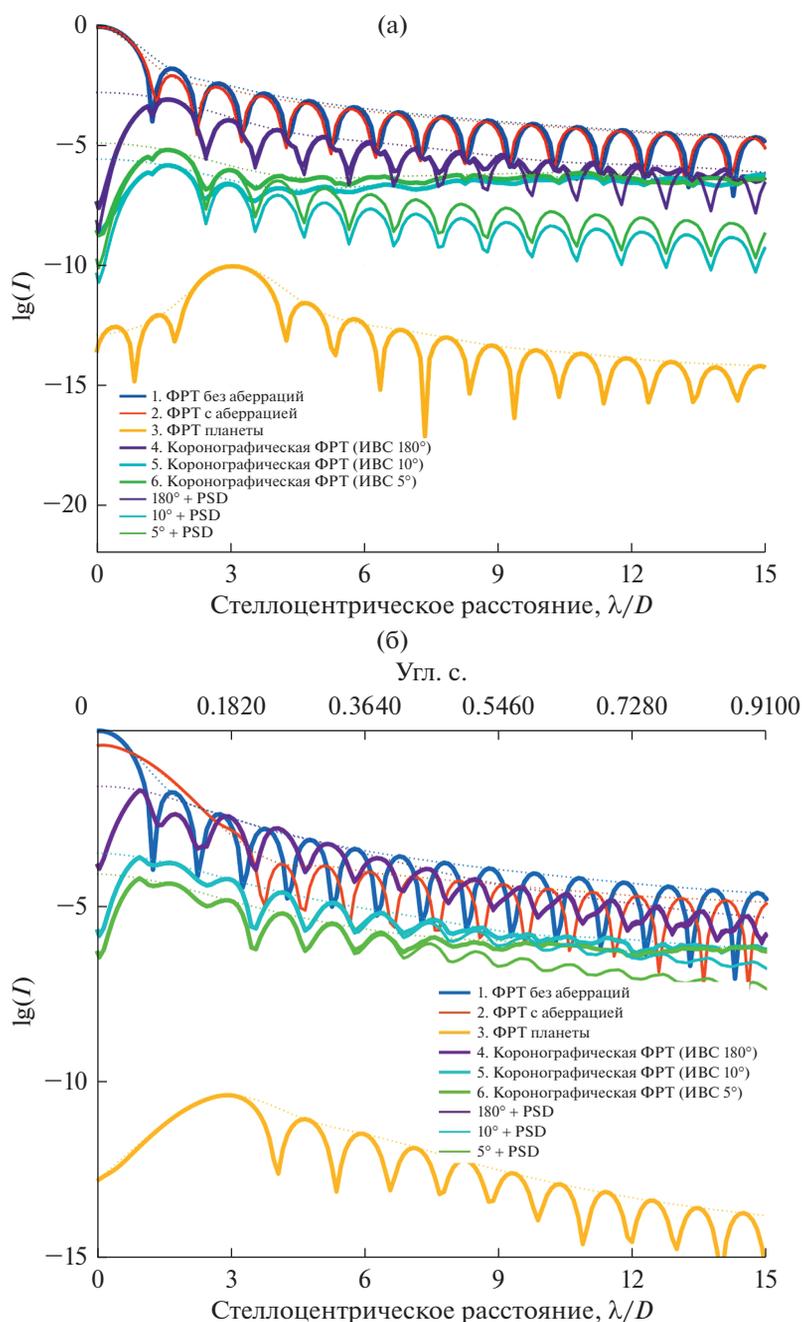


Рис. 1. Функции рассеяния точки (ФРТ), полученные моделированием: (а) для величины aberrаций волнового фронта $\lambda/(10 \times D)$ p-v (от максимума до минимума), (б) для величины aberrаций волнового фронта λ/D p-v ($\lambda = 500$ нм). Соответствие линий указано на вкладках к рисункам: (1) – идеальная (безабберационная) ФРТ для зеркального телескопа (без спайдеров) с главным и вторичным зеркалами 1.7 и 0.6 м. (2) – ФРТ телескопа с aberrациями и микро-шероховатостью поверхности зеркал (параметры моделирования см. ниже). (3) – ФРТ экзопланеты, отстоящей от звезды на стеллоцентрическом расстоянии (от англ. – stellocentric separation) на $\approx 0.18''$ ($3 \times \lambda/D$) имеет световой поток на 10^{10} меньше потока от звезды, (4) – коронографическое изображение звезды при ФРТ (3) при повороте зрачка на 180° и соответствующем наложении зрачка, (5) – коронографическое изображение звезды при ФРТ (3) при повороте зрачка на 5° .

ствующем уровне остаточных aberrаций, которые обычно дают вклад в области низких пространственных частот (до $10-15 \lambda/D$) и микрошероховатости оптических поверхностей (в области средних и высоких пространственных частот) яв-

ляется исправление и активная коррекция волнового фронта средствами адаптивной оптики.

Стационарные (неуправляемые) фазовые экраны, например, записанные голограммы, компенсирующие остаточные aberrации, плохо

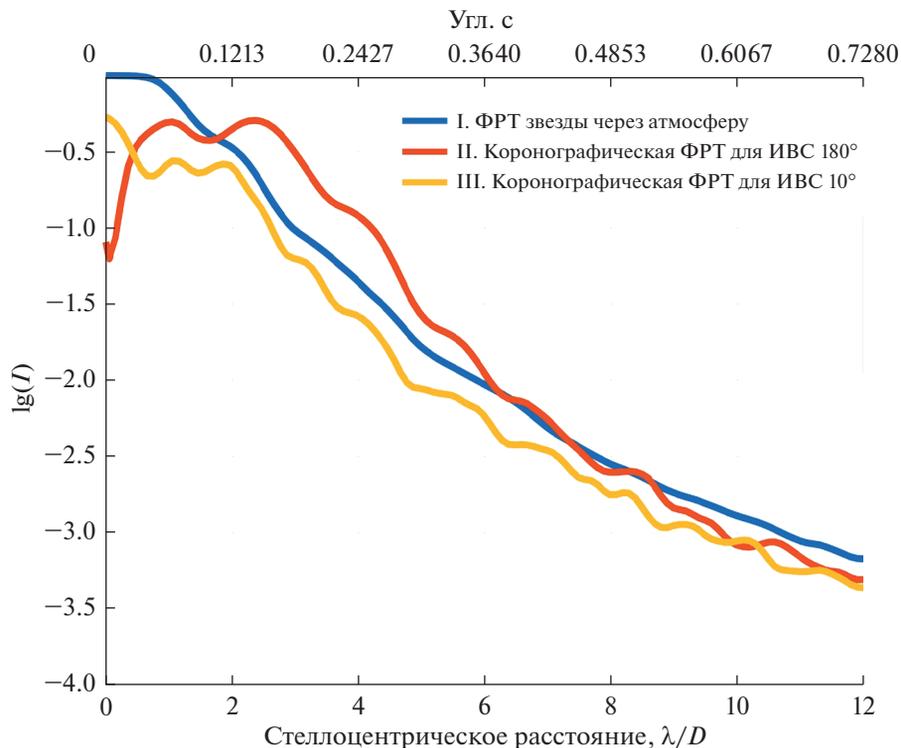


Рис. 2. Некоронаграфическая ФРТ, прошедшая через атмосферу, и соответствующая ей коронаграфическая ФРТ для телескопа с апертурой 1.7 м, $\lambda = 500$ нм. Параметры моделирования соответствуют рис. 1а.

применимы для решения этой задачи. При выведении на орбиту космического телескопа конструктивные элементы телескопа, главный шпангоут и главное зеркало, др. элементы испытывают многочисленные механические перегрузки, при летной эксплуатации телескопа становится критичным режим термостабилизации, наконец, точность и продолжительность визирования также ограничены, как результат проявляются медленно изменяющиеся (квазистатические) искажения волнового фронта.

Для наземных телескопов, система разгрузок при разных углах восхождения звезды исправляет остаточные aberrации лишь до определенного уровня, обычно конструктивно менее искажения от атмосферного экрана.

Интересно отметить, что вынесенная маска коронаграфа не предъявляет требований высокого качества волнового фронта, но предъявляет требования по точности синхронного положения на орбите двух аппаратов с телескопом и с маской, которые пока практически не реализованы (Peguman и др., 2018).

Рис. 1б иллюстрирует режим дифракционно ограниченного разрешения для орбитального (космического) телескопа, по крайней мере, на пределе современных отечественных технологий (Тавгов и др., 2018).

Наземные телескопы обычно проектируют и изготавливают с меньшим оптическим качеством, чем космические телескопы. Качество наземных телескопов в несколько раз лучше, чем искажения, вносимые атмосферным экраном, что на порядок хуже качества волнового фронта космического телескопа. Поэтому следующим примером существенного искажения волнового фронта мы рассмотрим эффект атмосферной турбулентности (рис. 2).

Здесь качество телескопа, с параметрами моделирования ФРТ (2) (с aberrациями и микрошероховатостью, соответствующими смоделированным на рис. 1а), дополнено искажением атмосферной турбулентностью — сверткой аппаратной функции телескопа со случайной реализацией турбулентного экрана атмосферы, соответствующему атмосфере с параметром Фрида равным 15 см. Соответствующая ФРТ показана синей линией (1), на рис. 2. Для удобства, стеллоцентрическое расстояние показано вдоль нижней горизонтальной оси, что масштабировано в единицах дифракционных радиусов (колец) Эйри (λ/D), также дополнено масштабом в единицах секунд дуги (верхняя горизонтальная ось) для оценки физического размера телескопа. Если излучение с волновым фронтом, соответствующим ФРТ (1), рис. 2, подать на вход коронаграфа, то оно оста-

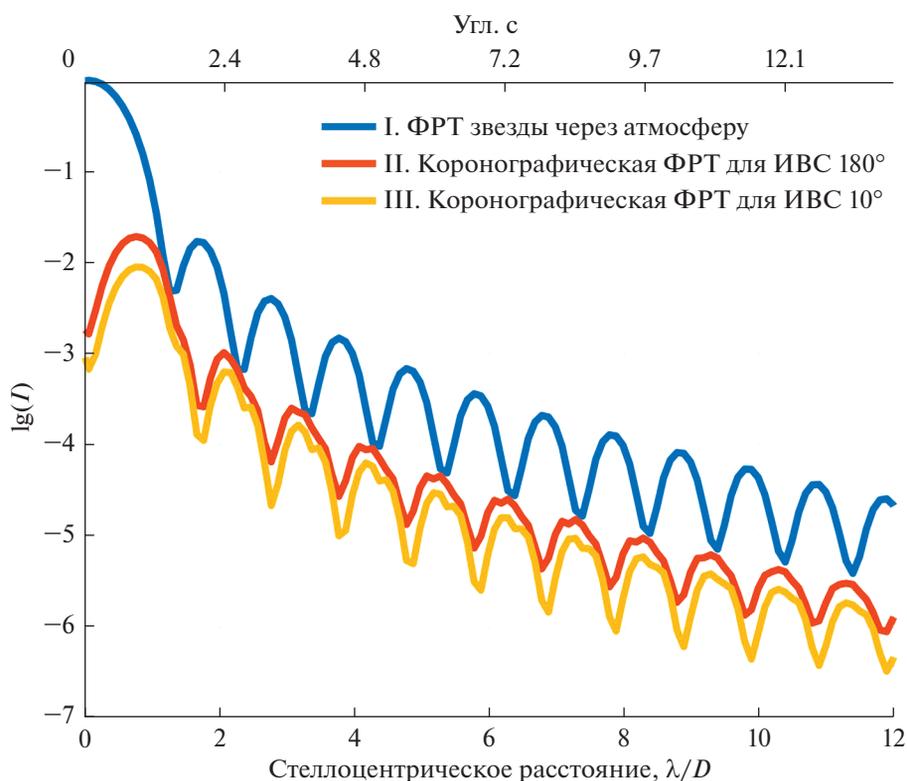


Рис. 3. Некоронаграфическая ФРТ, прошедшая через атмосферу, и соответствующая ей коронаграфическая ФРТ для телескопа с апертурой 10 мм, $\lambda = 500$ нм. Параметры моделирования соответствуют рис. 2а.

нется практически неослабленным, см. распределение (2) — ФРТ после коронаграфа.

Коронаграфическое ослабление станет возможным, если существенно уменьшить размер апертуры телескопа, см. рис. 3. Здесь воспроизведены зависимости (1) и (2), соответствующие зависимостям на рис. 2 и полученные при тех же условиях, но для малой апертуры телескопа $D = 10$ мм (см. различие в верхней горизонтальной оси, показывающей пространственное разрешение телескопа в угловых единицах дуги).

Рис. 3 показывает, что при малой апертуре коронаграф функционален для заметного ослабления излучения осевого источника, что позволяет испытывать его в натурном эксперименте, используя естественный свет звезды. Безусловно, телескоп с апертурой 10 мм не функционален для углового разрешения экзопланеты, и как указывалось выше, переход к телескопу с большей апертурой потребует дополнительных усилий по *пиксельной* коррекции искажений волнового фронта.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В звездном коронаграфе величина ослабления осевого источника (фона звезды) зависит, главным образом, от качества волнового фронта оп-

тического излучения, падающего на вход коронаграфа. Классически, волновой фронт измеряют интерферометром (Коломийцов, 1976) или оценивают теневым методом. Также волновой фронт измеряют датчиком (Шака-) Гартмана или другими специализированными датчиками. В эксперименте мы использовали модель датчика (Шака-) Гартмана Thorlabs WFS150-5C с программным выходом измеренного ВФ на ПК (персональный компьютер, чтением и управлением устройства, скомпилированными в среде MatLab®). Датчик Гартмана состоял из матрицы 150×150 микролинз, сопряженной с ПЗС 1280×1024 матрицей. Программный комплекс содержит автоматизированный ввод изображения в ПК со встроенным алгоритмом обработки для построения двумерной карты (распределения) волнового фронта, нормированного на центральную длину волны оптического излучения. Схема эксперимента показана на рис. 4.

В эксперименте (рис. 4а) свет от имитатора звезды (показано в прямоугольной рамке) посредством системы плоских зеркал был направлен на датчик Шака-Гартмана. Имитатор звезды состоял из лазера, пространственного фильтра с диафрагмой (10 мкм), находящейся в фокусе линзы-колиматора. В качестве одного из зеркал использовали управляемое наклонное зеркало на

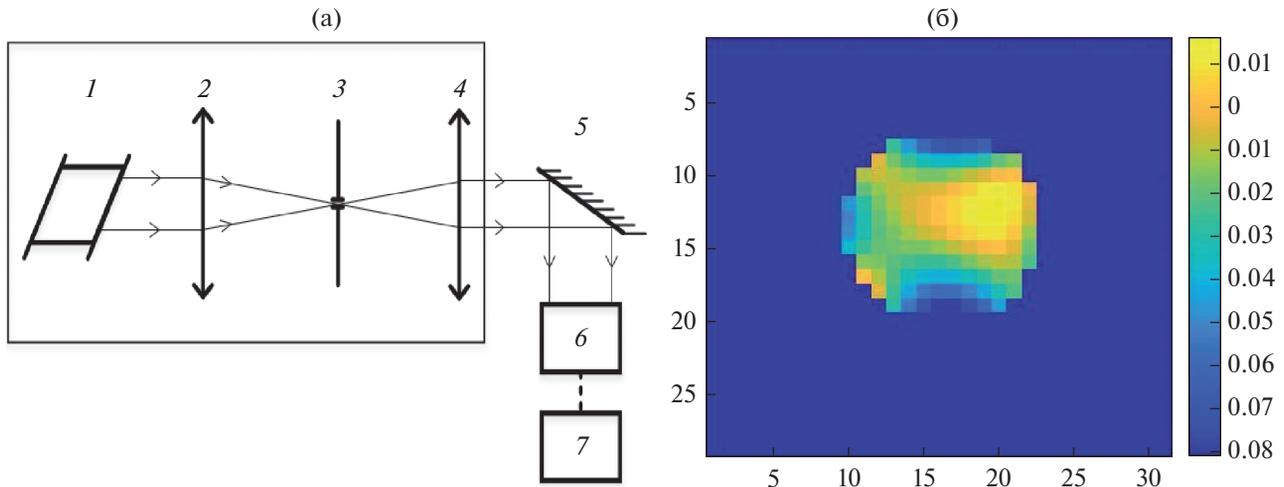


Рис. 4. Измерение ВФ после лазерного имитатора звезды (в рамке). (а) — схема измерения: 1 — лазер; 2 — объектив; 3 — диафрагма; 4 — коллиматор; 5 — наклонное управляемое зеркало (пьезо-трипод); 6 — датчик волнового фронта Гартмана; 7 — ПК. (б) — измеренное распределение ВФ.

механической платформе пьезо-трипод с тремя управляемыми пьезо-актуаторами.

На рис. 4б показано измеренное распределение волнового фронта, нормированное на длину волны $\lambda = 530$ нм. Измеренный ВФ показывает наличие искажений волнового фронта (аббераций) порядка $\lambda/10$ p-v (от минимума до максимума, *от англ. peak-to-valley*), $RMS \sim \lambda/30$, что определяется качеством линзы-коллиматора и зеркал. В эксперименте были использованы плоские зеркала, имеющими качество поверхности $\lambda/20$ p-v (для $\lambda = 633$ нм). Для оптической системы из N последовательных однопольных зеркал результирующее качество ухудшается пропорционально $\sqrt{N}/\cos(i)$, где i — угол падения.

Искажения ВФ от плоской формы (в зрачке) влияют на величину ослабления фона осевого источника посредством интерференционного коронографа (ИВС) по-разному, если использовать ИВС с различными значениями угла вращательного сдвига: 180° , 10° , 5° (углами совмещения зрачков, разделенных ранее светоделителем интерферометра). Так при уменьшении угла вращательного сдвига, чувствительность к искажению ВФ уменьшается, см. рис. 1 (ср. кривые (4) и (5)) (Malacara, 2007). Однако, одновременно при меньших углах вращательного сдвига, внутренний рабочий угол интерференционного коронографа увеличивается, что эквивалентно ухудшению пространственного разрешения коронографа. Внутренний рабочий угол (*от англ. IWA — inner working angle*) характеризует стеллоцентрическое расстояние, когда пропускание коронографа уменьшается в два раза по отношению к его максимальному пропусканию. Для интерференционного коронографа (Frolov и др., 2016; Tavrov и др., 2011) с поляризационным делителем на входе максимальное пропускание, приходящееся на пиксель

фото-приемного устройства, незначительно осциллирует и в среднем не превышает 0.25 (сигнала планеты). Так для ИВС $180^\circ - IWA \approx 0.38\lambda/D$, для ИВС $10^\circ - IWA \approx 4.5\lambda/D$ и для ИВС $5^\circ - IWA \approx 9\lambda/D$. На рис. 5 показаны соответствующие функции пропускания интерференционных коронографов ИВС 180° , ИВС 10° , ИВС 5° в зависимости от стеллоцентрического расстояния (по горизонтальной оси) (Frolov и др., 2016).

АБЕРРАЦИИ НЕОБЩЕГО ПУТИ. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИКИ И КОНСТРУКЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОРОНОГРАФА

Оптические схемы интерференционных коронографов общего пути с различными углами вращательного сдвига приведены на рис. 6. Принципы работы схем ИВС 180° (рис. 6а) с фиксированным углом вращательного сдвига и ИВС с изменяемым углом вращательного сдвига (рис. 6б) обсуждались в (Frolov и др., 2016; Tavrov и др., 2011). Для схем рис. 6б—6в характерна увеличенная чувствительность к поляризационной неоднородности по апертуре, по причине трех последовательно установленных поляризационных элементов: двух поляризационных светоделителей и полуволновой пластинки. Волновая пластинка оптимизирована на центральную длину волны спектрального диапазона и предназначена для увеличения пропускания коронографа, ее ахроматизм не критичен для коронографического погашения на нецентральной длине волны.

Новые схемы ИВС с настраиваемым углом сдвига находятся в исследовании, но для упрощения эксперимента в данной работе нами был выбран вариант ИВС 180° , особенности работы которого кратко состоит в следующем. Семь отра-

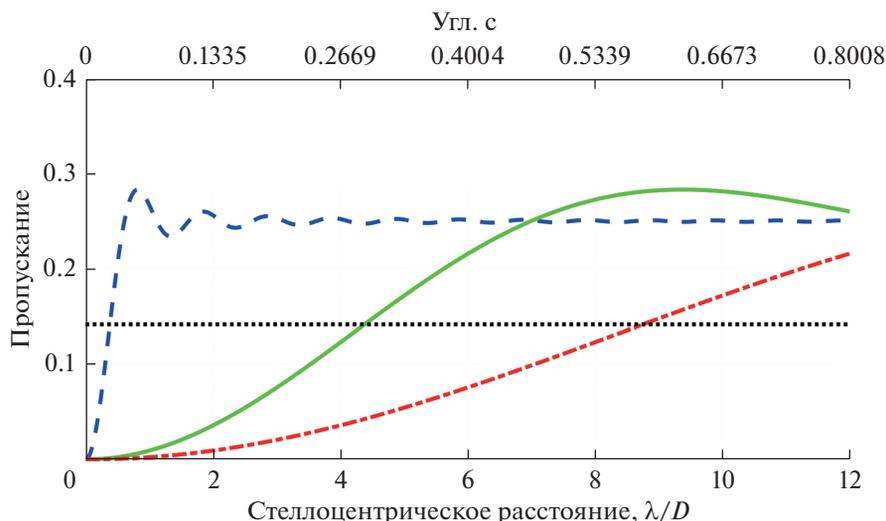


Рис. 5. Пропускание интерференционного коронографа с различными углами поворота изображения в зависимости от стеллоцентрического расстояния. ИВС 180° – синяя (штрихпунктирная) линия. ИВС 10° – зеленая (сплошная) линия. ИВС 5° – красная (пунктирная) линия. Горизонтальная черная (пунктирная) линия показывает уровень пропускания 0.5 от максимального пропускания.

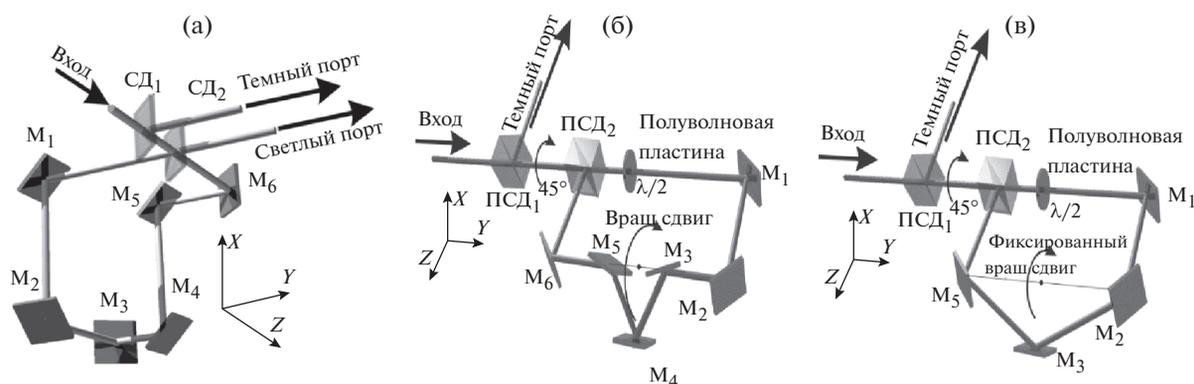


Рис. 6. Оптические схемы интерференционных коронографов общего пути с различными углами вращательного сдвига: (а) – ИВС 180° (угол фиксирован); (б) – ИВС с переменным углом; (в) ИВС 5° (угол фиксирован, с пятью отражениями).

жательных элементов (светоделитель и плоские зеркала) расположены последовательно. Угол падения на каждый отражающий элемент равен 45°, но плоскостность схемы принципиально не сохранена, что обеспечивает поворот изображения на 180° при формировании зрачка в плоскости светоделителя при сложении волн. По причине угла падения под 45°, образуются эллиптические формы апертур в плоскости зеркал и светоделителя. Они наложены с взаимным поворотом, если отобразить оптическую схему в соответствующей развертке призмы, так как последовательно расположенные зеркала геометрически образуют призму без стекла. Дифракционный анализ показывает разные линейные масштабы дифракционных колец в эллиптических апертурах, что приводит к абберациям, образованным схемой коронографа.

В дополнении к указанным дифракционным эффектам присутствуют остаточные абберации зеркал и светоделителя, обусловленные их неплоскостностью в результате ограниченной точности их изготовления, а также микро-шероховатостью оптических поверхностей (точность шлифовки и полировки), которые вызывают в совокупности эффект, характеризуемый абберациями необщего пути (*от англ. non-common-path aberrations*).

Понятие необщего пути здесь различается от использованного выше (интерферометра общего пути). Под *абберациями необщего пути* здесь понимаются принципиально неодинаковые положения плоскостей возможного корректора ВФ (элемента адаптивной оптики (АО)), датчика волнового фронта, например, датчика Гартмана, и промежуточных плоскостей элементов оптиче-

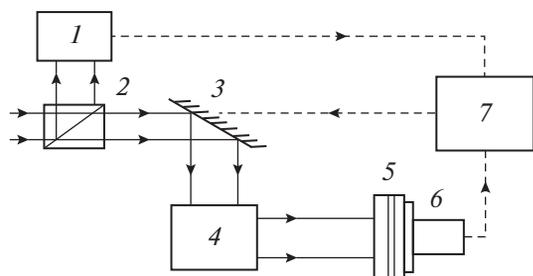


Рис. 7. Оптическая блок-схема для одновременного измерения волнового фронта датчиком Гартмана и измерением коронографического погашения: 1 – датчик Гартмана; 2 – светоделитель; 3 – зеркало (трипод); 4 – коронограф; 5 – объектив; 6 – камера; 7 – ПК.

ской системы телескопа, коронографа, интерферометра и т.п., дифракционно искажающих исходное коронографическое изображение. Важно, что число элементов оптической системы, число плоскостей превышает одну или две плоскости, где установлены пиксельные устройства корректирующей адаптивной оптики.

Для ослабления aberrаций необщего пути, привнесенных, в частности, интерференционным коронографом, корректирующая система АО должна “работать вперед”, т.е. генерировать инверсный амплитудно-фазовый корректирующий экран (с отрицательным знаком) перед вносимыми aberrациями. Теоретически такой процесс можно описать преобразованием Френеля, но на практике задача усложняется наличием многих апертур и поэтому применяется итерационный алгоритм.

Для точной коррекции ВФ применяют прецизионную АО (*от англ. ExAO – extremely (precise) adaptive optics* (Guyon, 2018)) и итерационный алгоритм управления, так как априори не известна согласованную пару адаптивных элементов, например, деформируемых зеркал, установленных на согласованном расстоянии друг от друга, каждое зеркало осуществляет фазовую модуляцию ВФ, и при распространении дифрагированной волны получают эффективную амплитудно-фазовую модуляцию. Для коррекции aberrации необщего пути применяют пикселированные устройства АО, обычно деформируемые управляемые зеркала с большим числом актуаторов или фазовые ЖК экраны. Последние имеют большее число пикселей, но в то же время, меньшую точность и хроматические эффекты.

Мы оценили величину aberrаций необщего пути в используемом интерференционном коронографе, поскольку важно было оценить достижимый коронографический контраст без использования *пикселированной* АО (использование которой в настоящее время тестируется и будет рассмотрено в последующей работе). Для оценки величины aberrации необщего пути, экспериментально, на вход оптической схемы было подано оптическое излучение с характеристиками, измеренными датчиком Гартмана и одновременно была измерена степень погашения фонового осевого источника после интерференционного коронографа. Оптическая схема лабораторного эксперимента с коронографом приведена на рис. 7.

На рис. 8 приведен результат измерения степени погашения осевого источника в этом экспери-

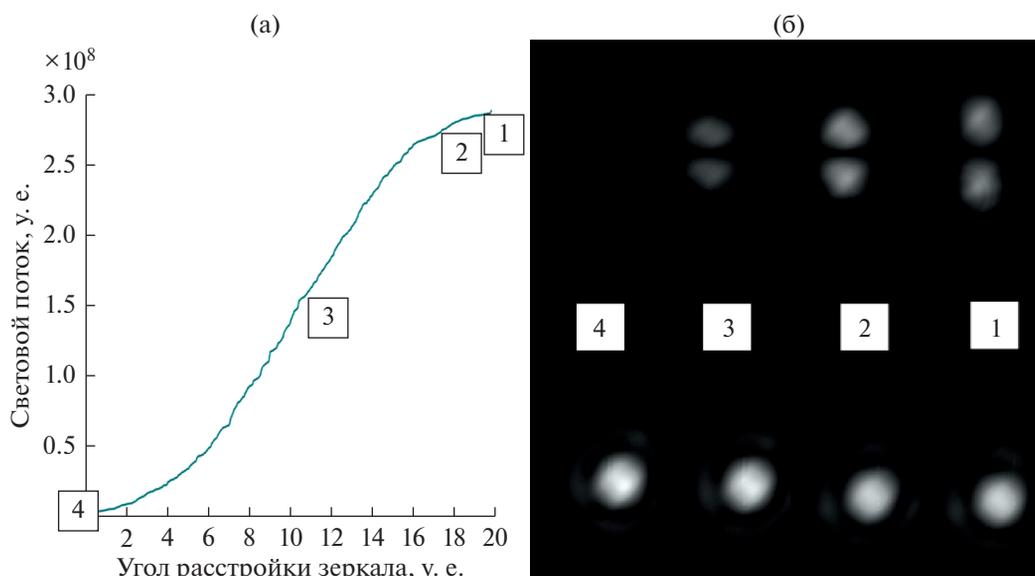


Рис. 8. Погашение оптического сигнала при настройке оси коронографа на источник. (а) – измерение погашения сигнала при настройке оси коронографа на фотоцентр источника. (б) – фотографии соответствующего погашения в нескольких точках (показаны цифрами) зависимости на рисунке (а), сверху – на темном выходе коронографа, снизу на светлом выходе коронографа.

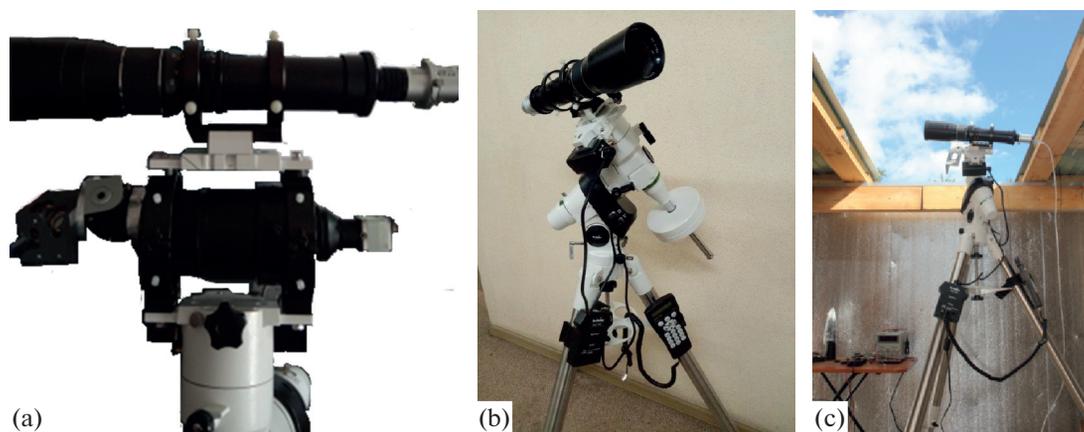


Рис. 9. (а) Фото макета коронографа, смонтированного на экваториальной монтировке параллельно зрительной трубе (ПЗС камеры и объектива), (б) упрощенная схема, по которой оценивали точность гидирования, (в) установка в полевых условиях.

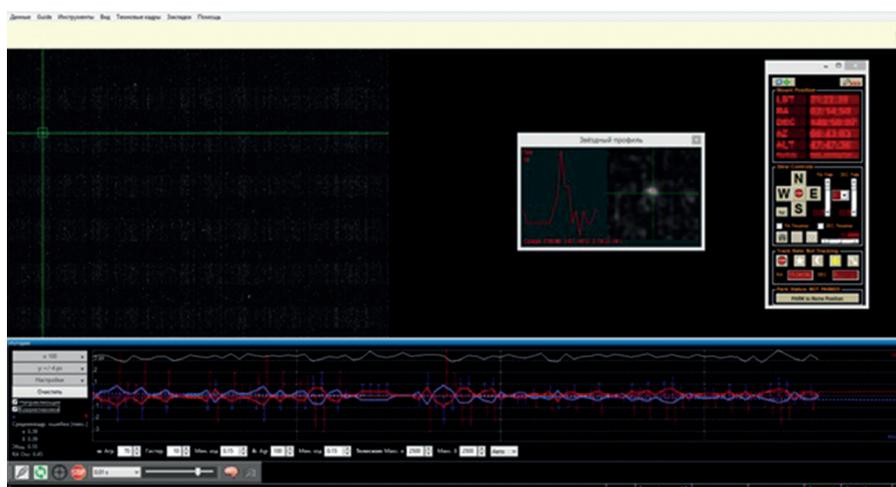


Рис. 10. Скриншот (снимок экрана) во время работы программ ведения звезды с управлением приводами экваториальной монтировки – RMS 0.55 пикселя ($\approx 1''$).

менте. Степень погашения показана в *динамическом* режиме (с контролируемым изменением угла осевого источника), при настройке углового положения управляемого наклонного зеркала последовательно переводят неосевой источник в осевой и наблюдают его погашение, см. рис. 8а–8б справа налево. Угол наклона зеркала показан вдоль горизонтальной оси в угл. с.

Рис. 8 показывает ослабление светового потока при угловом наведении оси коронографа на коллимированный источник света не менее чем на два порядка (120 раз), что примерно соответствовало качеству ВФ по среднеквадратичному отклонению RMS: $\Delta\psi_{\text{RMS}} \sim \lambda/50$. Оценку производили согласно следующей формуле:

$$I \propto (1 - \cos(\Delta\psi_{\text{RMS}})). \quad (2)$$

В единицах r - v волновой фронт имеет качество по апертуре $\Delta\psi \sim \lambda/15$ (RMS), таким образом, эффект aberrаций необщего пути, привносимых коронографом, сказывается на уменьшении величины коронографического качества, при погашении более двух порядков.

УСТАНОВКА КОРОНОГРАФА И ГИДИРОВАНИЕ НА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ МОНТИРОВКЕ

Для работы по звезде, макет интерференционного коронографа был закреплен на экваториальной монтировке, см. фото на рис. 9а. Однако на начальном этапе для упрощения апробации получения “первого света” работу по звезде производили с объективом с фокусным расстоянием рав-

ным фокусу объектива коронографа $F = 500$ мм и ПЗС матрицей, рис. 9б.

В качестве начального этапа мы запрограммировали управление механизмом экваториальной монтировки и провели измерение точности удержания фотоцентра звезды на одном пикселе ПЗС. Это дало возможность проверить нестандартную процедуру настройки экваториальной монтировки для автоматического ведения (гидирования) с удержанием предполагаемой оси коронографа на фотоцентре выбранной звезды с точностью одного пикселя $2''$. На рис. 10 приведен скриншот (снимок экрана), полученный в режиме гидирования, в частности, продемонстрирована точность удержания оси порядка 0.55 пикселя (RMS), что приблизительно равно $1''$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе мы рассмотрели особенности функционирования интерференционного звездного коронографа с вращательным сдвигом. Описаны некоторые технические вопросы по подготовке натурального эксперимента с указанным типом коронографа. Проведено моделирование характеристик коронографического изображения с оптикой телескопа, учитывающее остаточные aberrации, микрошероховатость оптических элементов, искажение волнового фронта турбулентным атмосферным экраном. В частности, показано, что при малой апертуре телескопа, приблизительно на порядок меньше области Фрида, коронограф функционален для погашения фонового изображения звезды более чем на два порядка по интенсивности. Таким образом, возможно тестирование коронографа на звезде без пиксельной коррекции ВФ.

Были проведены лабораторные измерения ВФ датчиком Гартмана, и впоследствии этот ВФ был подан на вход экспериментального макета коронографа. Измеренный уровень коронографического погашения на более чем два порядка продемонстрировал, в частности, что величина aberrаций необщего пути (характеризующих оптику интерференционного коронографа (ИВС 180°)), оказывает меньший искажающий эффект на коронографическое погашение. То есть эффект aberrаций необщего пути менее эффективен от искаженного ВФ на входе в коронограф. Расчетные значения погашения и измеренные совпадают по порядку величины и составляют: коронографическое погашение 120 раз, фон на стеллоцентрическом расстоянии — удалении от оси яркого источника света до $2-3 \lambda/D$ — ослабление в 15 раз.

Полученные характеристики коронографа достаточны для отработки алгоритмов гидирования инструментальной оси коронографа на целевую звезду. Таким образом, описанный макет интерференционного коронографа прошел в лаборато-

рии первоначальные тесты функциональности и запланирован для натуральных измерений по звездному небу. Также ведутся работы по управлению пикселированным устройством АО, необходимым при увеличении апертуры телескопа, превышающей размер области Фрида (~ 10 см). Описание особенностей функционирования АО и результатов натуральных испытаний запланированы в следующих работах.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Российской Федерации и Министерства высшего образования и науки РФ по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коломийцов Ю.В.* Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
- Сайт с базой данных по экзопланетам — <http://www.exoplanet.eu> (20 сентября 2020).
- Сайт библиотеки для расчета оптических систем Proper — <http://proper-library.sourceforge.net> (08 октября 2020).
- Baudoz P., Rabbia Y., Gay J.* Achromatic interfero coronagraphy I. Theoretical capabilities for ground-based observations // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 141. № 2. P. 319–329. <https://doi.org/10.1051/aas:2000120>
- Cash W., Schindhelm E., Arenberg J., Lo A., Polidan R., Kasdin J., Vanderbei R., Kilston S., Noecker C.* External occulters for direct observation of exoplanets: an overview // *Proc. SPIE. UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts III*, 2007. V. 6687. P. 668712. <https://doi.org/10.1117/12.732645>.
- Frolov P., Shashkova I., Bezymyannikova Y., Kiselev A., Tavrov A.* Achromatic interfero-coronagraph with variable rotational shear: reducing of star leakage effect, white light nulling with lab prototype // *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 2015. V. 2. № 1. P. 011002. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.2.1.011002>
- Frolov P., Shashkova I., Bezymyannikova Yu., Kiselev A., Tavrov A.* Achromatic interfero-coronagraph with variable rotational shear: reducing of star leakage effect, white light nulling with lab prototype // *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 2016. V. 2. № 1. P. 011002. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.2.1.011002>
- Golimowski D.A., Clampin M., Durrance S.T., Barkhouser R.H.* High-resolution ground-based coronagraphy using image-motion compensation // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 4405–4416. <https://doi.org/10.1364/AO.31.004405>
- Guyon O., Pluzhnik E.A., Kuchner M.J., Collins B., Ridgway S.T.* Theoretical Limits on Extrasolar Terrestrial Planet Detection with Coronagraphs // *Astrophys. J.* 2006. V. 167. № 1. P. 81–99. <https://doi.org/10.1086/507630>
- Guyon O.* Extreme Adaptive Optics // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2018. V. 56. P. 315–355.

- Howell S.B.* Handbook of CCD Astronomy. 2-nd edition. Cambridge University Press, 2012. ISBN: 9780511807909.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511807909>
- Lyon R.G., Clampin M., Woodruff R., Vasudevan G., Shao M., Levine M., Melnick G., Tolls V., Petrone P., Dogoda P., Duva Ju., Ge Ji.* Visible Nulling Coronagraphy for Exoplanetary Detection and Characterization // Proc. of the Int. Astron. Union. 2005. V. 1. № C200. P. 345–35.
<https://doi.org/10.1017/S1743921306009574>
- Malacara D.* Chapter 5. Radial, Rotational, and Reversal Shear Interferometer. P. 205. (in the book “Optical Shop Testing”) / Ed. Malacara D. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 888 p. ISBN: 978-0-471-48404-2.
- Mawet D., Pueyo L., Moody D., Krist J., Serabyn E.* The Vector Vortex Coronagraph: sensitivity to central obscuration, low-order aberrations, chromaticism, and polarization // Proc. SPIE. Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation, 2010. V. 7739. P. 773914.
<https://doi.org/10.1117/12.858240>.
- Perryman M.* The Exoplanet Handbook. 2-nd edition. Cambridge Univ. Press, 2018. ISBN: 9781108304160.
<https://doi.org/10.1017/9781108304160>
- Tavrov A.V., Kobayashi Y., Tanaka Y., Shioda T., Otani Y., Kurokawa T., Takeda M.* Common-path achromatic interferometer–coronagraph: nulling of polychromatic light // Opt. Lett. 2005. V. 30. № 17. P. 2224–2226.
<https://doi.org/10.1364/OL.30.002224>
- Tavrov A., Korablev O., Ksanfomaliti L., Rodin A., Frolov P., Nishikwa J., Tamura M., Kurokawa T., Takeda M.* Common-path achromatic rotational-shearing coronagraph // Opt. Lett. 2011. V. 36. № 11. P. 1972–1974.
<https://doi.org/10.1364/OL.36.001972>
- Tavrov A., Kameda S., Yudaev A., Dzyuban I., Kiselev A., Shashkova I., Korablev O., Sachkov M., Nishikawa Ju., Tamura M., Murakami G., Enya K., Ikoma M., Narita N.* Stellar imaging coronagraph and exoplanet coronal spectrometer: two additional instruments for exoplanet exploration onboard the WSO-UV 1.7-m orbital telescope // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2018. V. 4. № 4. P. 044001.
<https://doi.org/10.1117/1.JATIS.4.4.044001>
- Traub W.A., Oppenheimer B.R.* Direct imaging of exoplanets // Ed. Seager S. (Tucson: Univ. Arizona Press). Exoplanets. 2010. P. 111–156.
<https://arxiv.org/pdf/1502.01702v1.pdf>