

УДК 535.417, 681.787

Тавров А.В.^{1,2}

¹ Институт Космических Исследований РАН, Россия,
117997, Москва, Профсоюзная 84/32: tavrov@iki.rssi.ru

² Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

ПРЕЦИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОЛНОВОГО ФРОНТА МЕТОДОМ НУЛЬ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Предложен метод экспресс контроля качества волнового фронта посредством нуль-интерферометра. Предложенный нуль-тест ахроматичен в широком спектральном окне. Рассмотрены современные методы контроля волнового фронта и преобразование волнового фронта в нуль-интерферометре.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ПОЛЯРИЗАЦИЯ, КОНТРОЛЬ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерительные методы интерферометрии широко используются для прецизионных измерений, их метрологическая аттестация основывается на масштабе длины волны видимого света λ , составляющей доли микрона. Сегодня актуальны задачи повышения чувствительности интерференционных измерений путем отстройки от механических возмущений и расширения спектрального окна – ахроматизация интерференционного метода. Одним из новых направлений является трехмерная интерферометрия темного поля (нуль-интерферометрия) [1, 2], основанная на принципах геометрической фазы и имеющая применение в астрономии для ахроматического погашения излучения звезды с целью увеличения контраста окрестности звезды, например для исследования экзопланет, протопланетных дисков и т. п. Наряду с прецизионными астрономическими приложениями трехмерный интерференционный метод темного поля перспективно применить для прецизионного анализа волнового фронта.

2.1. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ПРЕЦИЗИОННОГО АНАЛИЗА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Анализ волнового фронта лазерного излучения, адаптивная оптика, тестирование оптических элементов, исследование влияния турбулентности атмосферы требуют точной реконструкции фазы оптического излучения. Известны два подхода к практическому решению данной проблемы: тест Гартмана и интерференционные методы.

Принцип действия Датчика Шака-Гармана (ДШГ) показан на рис. 1, где волновой фронт разбивают на фрагменты растром микролинз и анализируют растр фокальных пятен матричным фотоприемником. Преимущество ДШГ в том, что он полностью ахроматичен, измерения практически не зависят от длины волны. ДШГ работает в том числе и с протяженными источниками света. Точность ДШГ ограничена качеством раstra микролинз и чувствительностью ССД, и составляет для промышленных образцов ДШГ $\sim \lambda/100$ и для научных образцов ДШГ $\sim \lambda/1000$ [3].

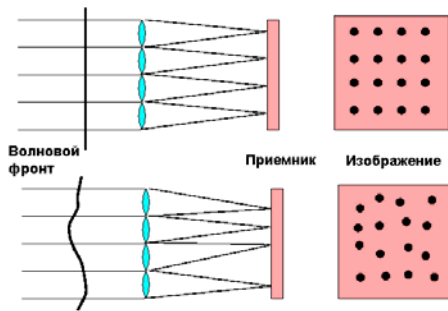


Рис. 1. Тест Гартмана

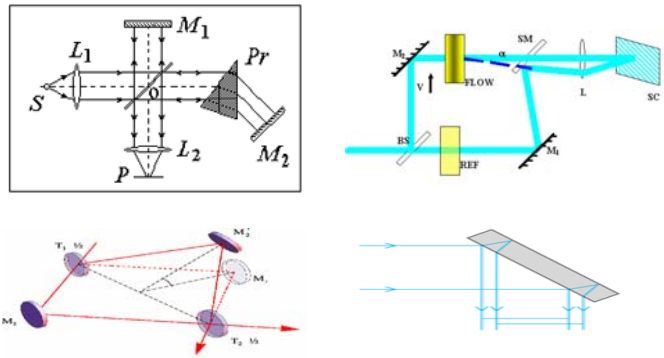


Рис. 2. Интерференционные методы

Интерференционные методы, рис. 2., изначально применялись для анализа волнового фронта. Основной задачей классической интерферометрии является изучение формы волнового фронта. В классических интерферометрах сравнения типа Тваймана-Грина, Маха-Цандера, Физо изучение формы волнового фронта осуществляется посредством сравнения исследуемого волнового фронта с опорным, формируемым эталонным элементом сравнения, высококачественной плоской или сферической зеркальной поверхностью.

В отличие от интерферометров сравнения в классических интерферометрах сдвига отсутствует вспомогательный эталонный элемент. Исследование формы волнового фронта основывается на анализе интерференционной картины взаимодействия двух одинаковых, сдвинутых или измененных (увеличенных, повернутых и т. п.) в пространстве друг относительно друга волновых фронтов. К настоящему времени существуют многочисленные схемные варианты, позволяющие осуществить сдвиг в пространстве, например интерферометр Мерти (плоскопараллельная пластина), система из двух дифракционных решеток - (Рончи-тест), призма-куб и т.д.

Несмотря на указанные различия в принципе работы классических интерферометров сдвига и сравнения, общим обстоятельством определяющим в конечном счете точность исследования формы волнового фронта, является качество изготовления элементов сдвига и сравнения. Это обстоятельство становится тем более существенным при исследовании протяженных волновых фронтов, поскольку в этом случае становится критичной точность изготовления оптических элементов сдвига, зеркал и светоделителей интерферометра.

Оптические элементы с качеством поверхности $\lambda/100$ (@ $\lambda=632,8$ мкм) сегодня становятся доступными.

2.2. СХЕМА НУЛЬ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Нуль-интерферометр (НИ) локализует темное поле интерференции при освещении его плоским волновым фронтом. Если падающий волновой фронт неплоский, то на «темном выходе» наблюдают свет. Схема трехмерного нуль-интерферометра приведена на рис. 3 и состоит из светоделителей (СД): ПСД (поляризационного СД) и СД, шести последовательных зеркал: $Z_1..Z_6$, расположенных

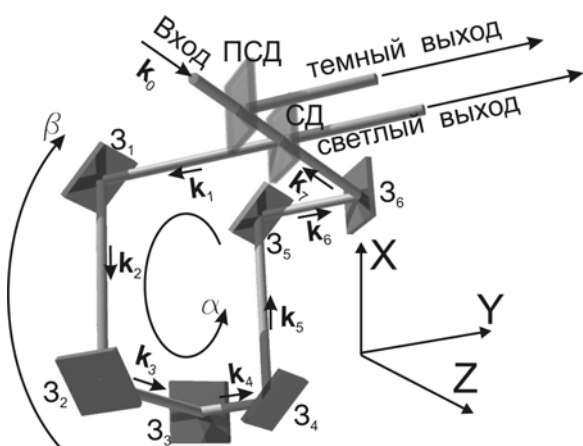


Рис. 3. Схема нуль-интерферометра

в вершинах куба. Выходы НИ: «светлый» и «темный» расположены по разную сторону от СД. Вследствие поворота изображения и электрического вектора на $\pm 90^\circ$ в плечах интерферометра α и β (см. рис. 3) на темном выходе НИ волны α и β складываются в противофазе, образуя темное поле одновременно для всех длин волн. Если НИ освещают волной с фазовым фронтом, отличным от плоского, то центрально-несимметричные фазовые aberrации в общем удваиваются. НИ нечувствителен к центрально-симметричным

аберрациям. В случае несимметричных aberrаций дополнительно к условию сложения волн α и β в противофазе добавляется несимметричное значение фазовой aberrации и условие темного поля нарушается обуславливая дополнительный свет на «темном выходе» интерферометра.

2.3. НУЛЬ-ИНТЕРФЕРОМЕТР В ЗАДАЧАХ ЗВЕЗДНОЙ КОРОНОГРАФИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

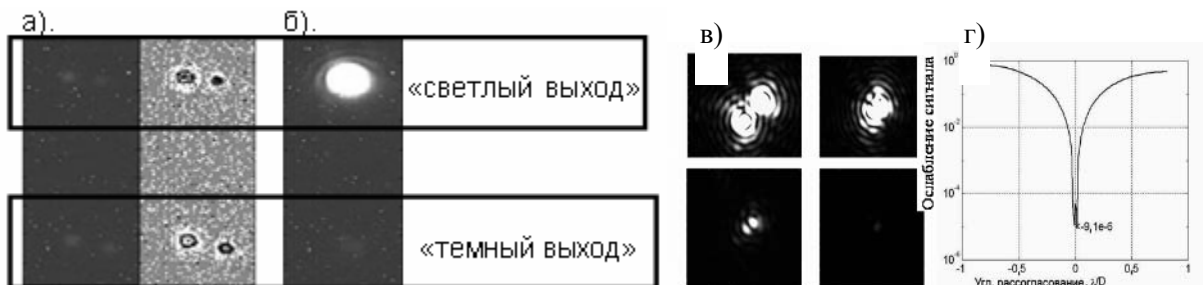
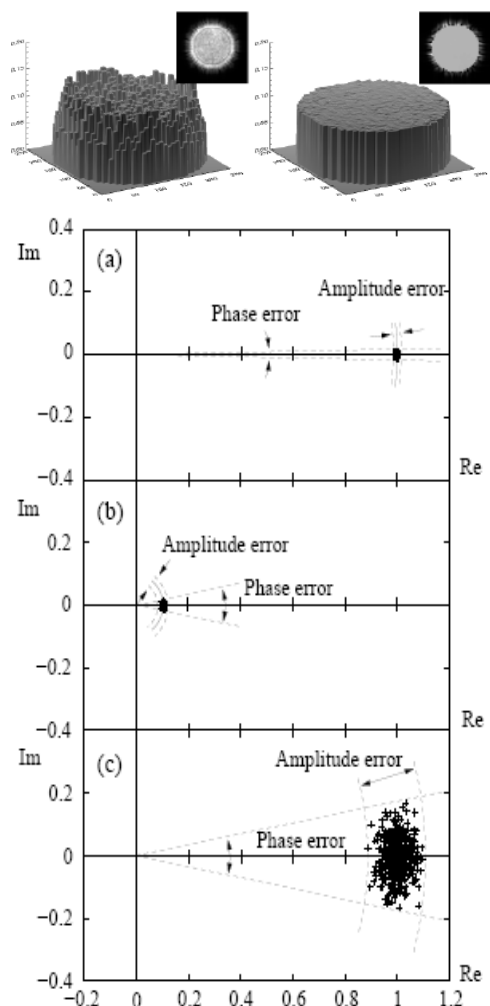


Рис. 4. Нуль-интерферометр: экспериментальные результаты



Измерительные методы интерферометрии широко используются для прецизионных измерений, их метрологическая аттестация основывается на масштабе длины волны видимого света λ , составляющей доли микрона. Сегодня актуальны задачи повышения чувствительности интерференционных измерений путем отстройки от механических возмущений и расширения спектрального окна – ахроматизация интерференционного метода. Одним из новых направлений является трехмерная интерферометрия темного поля (нуль-интерферометрия) [1, 2], основанная на принципах геометрической фазы и имеющая применение в астрономии для ахроматического погашения излучения звезды с целью увеличения контраста окрестности звезды, например для исследования экзопланет, протопланетных дисков и т. п. Наряду с прецизионными астрономическими приложениями трехмерный интерференционный метод темного поля перспективно применить для прецизионного анализа волнового фронта.

Для задач звездной коронографии было произведено экспериментальное подтверждение *ахроматичности* нуль-интерферометра при

Рис. 5. Преобразования волнового фронта в нуль-интерферометре: а) ВФ перед НИ. в), с) возрастание ошибки ВФ после НИ.

погашении белого света галогенной лампы в диапазоне 400...1000 нм. Так на рис. 4 показаны включенные электрически: а) – только наклонный волновой фронт (удвоение aberrации), б) – нормально падающий волновой фронт, в) покадровая съемка погашения сигнала на «темном выходе» интерферометра при устранении наклона волнового фронта и г) погашении белого света галогенной лампы в диапазоне 400...1000 нм.

измеренная ФЭУ зависимость погашения сигнала. Для данного погашения света на $10^{-5} \dots 10^{-6}$ эквивалентное качество ВФ составило $\lambda/400 \dots \lambda/800$.

Альтернативное применение этого принципа представляет прецизионный тестер плоского волнового фронта для широкого спектра оптических задач. Возвращаясь к задаче звездной коронографии, требующей номинального погашения света на $10^{-9} \dots 10^{-10}$ востребовано качество ВФ $\lambda/10000$ rms (среднеквадратичного отклонения). Для данного исправления ВФ разрабатывается [4] поэтапное исправление ВФ существующими системами адаптивной оптики (АО), имеющими номинальную точность до $\lambda/100 \dots \lambda/1000$ с применением несбалансированного по интенсивности нуль-интерферометра. На рис. 5 показаны схематичные преобразования ВФ до и после НИ: усиление фазового контраста спекл-поля для компенсации устройствами АО: а) ВФ перед НИ, в), с) возрастание ошибки ВФ после НИ в зависимости от качества или амплитудного дисбаланса плеч НИ.

Часть работы финансировалась ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт № 02.740.11.0449).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тавров А. В.** Технические принципы ахроматической интерферометрии для звездной коронографии // ЖТФ. 2010. Том. 80. Вып. 3. С. 83-92.
2. **Tavrov A., Kobayashi Yo., Tanaka Yo., Shioda T., Otani Yu., Kurokawa T., Takeda M.** Common-path achromatic interferometer-coronagraph: nulling of polychromatic light // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 2224.
3. **Evans Ju., Macintosh B., Poyneer L., et. al.**, "Demonstrating sub-nm closed loop MEMS flattening," // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 5558.
4. **Yokochi K., Murakami N., Nishikawa Ju., Abe L., Tamura M., Tavrov A., Takeda M., Kurokawa T.**, "Speckle level suppression using an unbalanced nulling interferometer in a high-contrast imaging system," // Opt. Express. 2011. V. 19. P. 4957.

A.V. Tavrov^{1,2}

¹ IKI-RAS Space Research Institute of RAS, Russia,
Profsoyuznaya ul. 84/32, Moscow 117997, E.mail: tvrov@iki.rssi.ru

² Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

WAVEFRONT PRECISE ANALYSIS BY MEANS OF NULLING INTERFEROMETER

Express analysis of wavefront by means of nulling interferometer is proposed. Nulling interferometer performs an achromatic measurement of wavefront in a wide spectral window from visible to near infra-red. The wavefront transformation in a nulling interferometer and the extreme precision of wavefront control are reported.

INTERFEROMETRY, NULL-TEST, WAVEFRONT CONTROL