

Ахроматический 3D-интерферометр для контроля и анализа качества волнового фронта

И. И. АХМЕТОВ*, П. Н. ФРОЛОВ**, Б. Б. ШКУРСКИЙ**, Б. С. РИНКЕВИЧЮС*,
А. В. КИСЕЛЕВ**, А. В. ТАВРОВ**

* Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,
e-mail: iiahmetov@gmail.com

** Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Дан анализ современных методов контроля волнового фронта оптических пучков. Рассмотрен ахроматический 3D-интерферометр для экспресс-контроля качества волнового фронта в широком спектральном диапазоне. Приведены описание эксперимента и примеры интерференционных картин плоского и искаженных волновых фронтов лазерных пучков, прошедших ламинарный или турбулентный потоки воздуха.

Ключевые слова: интерферометрия, контроль волнового фронта, 3D-интерферометр.

The analysis of modern methods of optical wavefront control is given achromatic 3D-interferometer for express analysis of wavefront quality in wide spectral range is considered. The description of experiment and the examples of interference patterns of plane and distorted wavefronts of laser beams propagated through laminar or turbulent air flows are presented.

Key words: interferometry, wavefront control, 3D-interferometer.

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 [1] и интерференционные методы [2]. Принцип действия датчика Гартмана (ДГ) основан на разбиении исследуемого волнового фронта на фрагменты растром микролинз и анализе раstra фокальных пятен матричным фотоприемником. Преимущества такого датчика в том, что он полностью ахроматичен, т. е. измерения практически не зависят от длины волны, и работает как с параллельными, так и протяженными источниками света. Точность ДГ ограничена качеством раstra микролинз и чувствительностью матричных фотоприемников и составляет для промышленных образцов около $\lambda/100$, а для научных образцов порядка $\lambda/1000$ [1].

Основная задача классической изображающей интерферометрии — изучение формы волнового фронта. В интерферометрах сравнения типа Тваймана—Грина, Маха—Цандера, Физо форму волнового фронта изучают методом сравнения исследуемого волнового фронта с опорным, формируемым эталонным элементом сравнения, высококачественной плоской или сферической зеркальной поверхностью [3]. В интерферометрах сдвига такой вспомогательный эталонный элемент отсутствует, и исследование формы волнового фронта основано на анализе интерференционной картины взаимодействия двух одинаковых, сдвинутых или измененных (увеличенных, повернутых и т. п.) в пространстве друг относительно друга волновых фронтов. В настоящее время существуют многочисленные варианты схем, позволяющих проводить сдвиг волновых фронтов в пространстве, например, интерферометр Мерти (плоскопараллельная пластина), система из двух дифракционных решеток (Рончи-тест), призма—куб и т. д.

Несмотря на указанные различия в принципах работы классических интерферометров сдвига и сравнения, общим обстоятельством, определяющим, в конечном счете, точность исследования формы волнового фронта, является качество изготовления элементов интерферометра (оптических элементов сдвига, зеркал, светоделителей). Сейчас становятся доступны оптические элементы с качеством поверхности $\lambda/100$ (на длине волны $\lambda = 632,8$ нм).

Методы оптической интерферометрии также широко используют для прецизионных измерений параметров волнового фронта [1]. Их метрологическая аттестация основана на исследовании масштаба длины волны видимого света, составляющей доли микрона. Задачи повышения чувствительности интерференционных измерений путем отстройки от механических возмущений особенно актуальны. Одно из новых научных направлений — трехмерная интерферометрия темного поля (нуль-интерферометрия) [4, 5], учитывающая геометрическую фазу [6]. В этом случае отсутствует зависимость модуляции фазы от длины волны. Наряду с прецизионными астрономическими приложениями, рассмотренными в [4, 5], трехмерный интерференционный метод темного поля перспективно применять и для прецизионного анализа волнового фронта лазерного излучения.

Фокальные изображения пучка с темным полем в центре [1] обычно формируют путем фокусировки лазерных мод высокого порядка. Центральное темное поле (нуль-область) возникает вследствие особенности разрыва фазы (осевой сингулярности) волнового фронта, которая может быть получена также и при помощи дифракционных элементов, таких как спиральная фазовая или зональная пластинка. Однако производство подобных дифракционных элементов весьма сложный процесс, а фазовый профиль поля на выходе очень чувствителен к ошибкам при производстве элементов. Предложены линзы [7], способные создать фокальную нуль-область без фазовой сингулярности, которые ме-

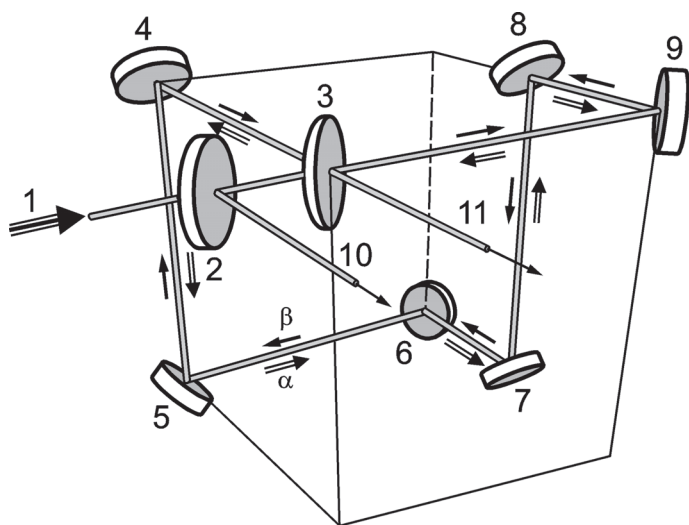


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема 3D-интерферометра: 1 — вход; 2, 3 — поляризационный и обыкновенный светоделители; 4—9 — зеркала; 10, 11 — темный и светлый выходы; α , β — направления обхода против и по часовой стрелке, соответственно

нее чувствительны к ошибкам при производстве. Интерферометры с нуль-областями используют для получения изображений сверхвысокого разрешения; в оптических пинцетах для захвата и манипулирования частицами, показатель преломления которых меньше, чем показатель преломления среды; в астрономии для поиска экзопланет; для захвата холодных атомов [7]. Фазовые пластинки, создающие нуль-области, применяют в оптико-проекционной фотолитографии.

В данной работе описан принцип получения темного поля в 3D-интерферометре. Приведены его оптическая схема контроля волнового фронта лазерных пучков и интерференционные картины, характеризующие чувствительность к параметрам волнового фронта анализируемого излучения. При освещении 3D-интерферометра плоским волновым фронтом он локализует темное поле интерференции, но если падающий волновой фронт не плоский, то на темном выходе наблюдают свет.

Принципиальная схема 3D-интерферометра приведена на рис. 1. Он состоит из светоделителей (СД) — поляри-

зационного 2 и обыкновенного 3, шести последовательных зеркал 4—9. Светлый 11 и темный 10 выходы интерферометра расположены по разную сторону от СД 3. Вследствие поворота изображения и электрического вектора поля на $\pm 90^\circ$ в плечах (направления обхода против и по часовой стрелке соответственно α и β) интерферометра на его темном выходе пучки складываются в противофазе, образуя темное поле интерференции одновременно для всех длин волн. Две волны, прошедшие через интерферометр в противоположных направлениях, приобретают взаимный геометрический поворот изображений на 180° . Направление плоскости колебаний электрического вектора световой волны повторяет поворот изображения на 180° , что обуславливает фазовый сдвиг на π радиан, требуемый для получения темного поля. Интерференция пучков, содержащая темное поле, локализована со стороны грани СД 3, обращенной в боковом направлении к входному пучку. Другой выход интерферометра — светлый, находится со стороны СД 3, обращенной противоположно ходу падающего пучка. СветоделиТЕЛЬ разделяет светлое и темное поля интерференции, что согласуется с законом сохранения энергии: локализация темной полосы по одну сторону СД соответствует локализации светлой полосы по другую его сторону. Оптическая схема 3D-интерферометра автоматически компенсирует хроматичность СД и зеркал благодаря распространению двух интерферирующих пучков в противоположных направлениях. Эти пучки имеют одинаковые спектральные характеристики, что является необходимым условием для получения темного поля.

Для образования темного поля предусмотрен поляризационный СД 2, конструктивно представляющий широкополосный поляризационный светоделительный кубик видимого диапазона. Через него входное излучение с вертикальной линейной поляризацией проходит без существенных потерь. Плечи интерферометра поворачивают азимут поляризации входящего излучения на $\pm 90^\circ$ и выходящий пучок приобретает поляризацию, совпадающую с направлением отражения поляризационного СД, и без существенных потерь направляется на темный выход интерферометра [8].

Схема экспериментального 3D-интерферометра. В целях демонстрации возможностей 3D-интерферометрии применительно к задачам контроля качества волнового фронта был собран опытный стенд, схема которого представлена на рис. 2.

Излучение от He—Ne-лазера 1 с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм проходит через микрообъектив 2, в фокусе которого установлена диафрагма 3 диаметром 10 мкм. Микрообъектив и диафрагма в совокупности являются пространственным фильтром. После прохождения фильтра расходящийся пучок направляется в коллиматор 4 с фокусным расстоянием $F = 350$ мм, на его выходе излучение имеет волновой фронт, максимально приближенный к плоскому. Далее расположена диафрагма 5 диаметром 5 мм, вырезающая часть плоского волнового фронта, падающего на юстировочное зеркало 6, позволяющее направить пучок вдоль оптической оси 3D-интерферометра 7. На выходе 3D-интерферометра изображения от светлого и темного выходов попадают в объектив ПЗС-камеры 8, подключенной к персональному компьютеру 9.

Интерференционные изображения, полученные на выходе 3D-интерферометра, направляются в установленную ПЗС-камеру таким образом, что они регистрируются синхронно с обоих выходов (со светлого — наверху кадра, с темно-

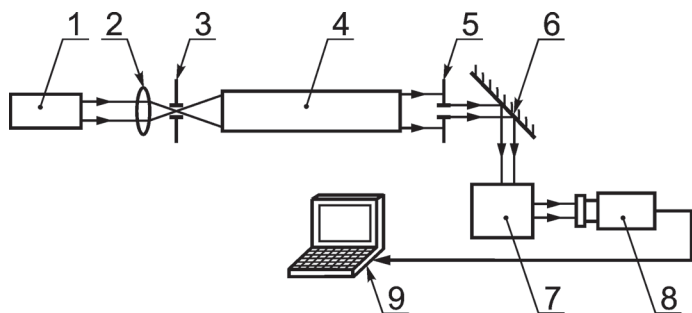


Рис. 2. Схема опытного стенда:

1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3, 5 — диафрагмы; 4 — коллиматор; 6 — юстировочное зеркало; 7 — 3D-интерферометр; 8 — ПЗС-камера; 9 — персональный компьютер

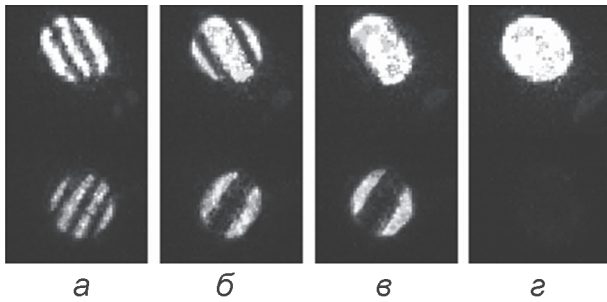


Рис. 3. Изображения на выходе 3D-интерферометра при расхождении угла наклона между его оптической осью и нормалью входного волнового фронта:

а, б, в, г — соответственно угол расхождения $1,4^\circ$; 1° ; $0,3^\circ$; менее $0,3^\circ$

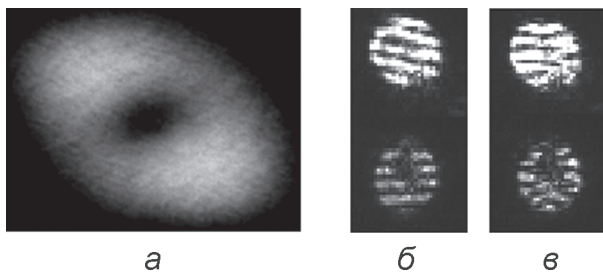


Рис. 4. Изображения на выходе 3D-интерферометра:

а — для недифрагмированного пучка; б, в — при ламинарном и турбулентном потоках, соответственно

го — внизу). Это позволяет записывать сразу два интерференционных изображения.

При помощи данного стенда можно оценить качество волнового фронта. Например, если при усреднении по плоскости зрачка достигнуто значение интерференционного контраста (видность интерференционных полос) $V = 0,9998$, то отношение интенсивностей сигнала между темным I_T и светлым I_C выходами имеет среднее квадратическое значение $I_C/I_T \approx 5 \cdot 10^{-5}$, что соответствует средней квадратической погрешности определения волнового фронта $\delta \approx \lambda/400$ на длине волны $\lambda = 630$ нм. Оценка $\lambda/400$ равна примерно половине всех aberrаций волнового фронта, присутствующих в системе 3D-интерферометра из-за того, что симметричные компоненты aberrаций эффективно компенсируются и составляют статистическую половину всех aberrаций.

Экспериментальные результаты. С использованием данного стенда проведен ряд демонстрационных измерений. На рис. 3 показаны изображения, полученные на выходе 3D-интерферометра при падении наклонного лазерного пучка и уменьшении угла наклона между оптической осью 3D-интерферометра и нормалью к плоскости волнового фронта. Из рис. 3, г следует, что оптические оси пучка и интерферометра практически совпадают. Изображения, формируемые на выходах интерферометра, представляют интерференционные картины, отличающиеся разностью фаз так, что интерференционному максимуму (минимуму) на светлом выходе соответствует интерференционный минимум (максимум) на темном. Также проведены эксперименты с источ-

ником белого света. В результате на выходе нуль-интерферометра получены изображения аналогичные изображениям, показанным на рис. 3, а—г.

На рис. 4, а представлено изображение, полученное на темном выходе 3D-интерферометра во время эксперимента, при котором из схемы стенда (см. рис. 2) были исключены пространственный фильтр, состоящий из СД 2, 3, и коллиматор 4. На рис. 4, б, в показаны изображения, полученные методом исследования, когда при помощи теплового источника создавали условия протекания ламинарного и турбулентного потоков воздуха на пути лазерного пучка.

Закключение. Разработан 3D-интерферометр для анализа качества волнового фронта лазерных пучков и проведен ряд демонстративных экспериментов. Показаны примеры интерференционных картин с различными волновыми фронтами, иллюстрирующие чувствительность 3D-интерферометра к параметрам волнового фронта. Помимо высокой чувствительности следует отметить, что 3D-интерферометр ахроматичен в достаточно широком диапазоне длин волн (от видимого до ближнего инфракрасного света). При высоком качестве волнового фронта порядка $\lambda/100$ и выше оценку можно проводить непосредственно по уровню сигнала (по интенсивности света, прошедшего через 3D-интерферометр), исключая трудоемкую процедуру восстановления волнового фронта как в методе Гартмана или по интерференционной картине. Также данный 3D-интерферометр позволяет анализировать волновой фронт слабого по интенсивности компонента изображения при сильной фоновой засветке.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ (грант №11.634.31.0074).

Л и т е р а т у р а

1. Evans Ju. e. a. Demonstrating sub-nm closed loop MEMS flattening // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 5558—5570.
2. Karasik A. Ya., Rinkevichius B. S., Zubov V. A. Laser Interferometry Principles / Ed. B. S. Rinkevichius. London: Mir Publishers and CRC Press, 1995.
3. Нгуен В. Т., Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В. Двухлучевые лазерные интерферометры. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
4. Тавров А. В. Технические принципы ахроматической интерферометрии для звездной коронографии // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 3. С. 83—92.
5. Tavrov A. e. a. Common-path achromatic interferometer-coronagraph: nulling of polychromatic light // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 2224—2226.
6. Клышко Д. Н. Геометрическая фаза Берри в колебательных процессах // УФН. 1993. Т. 163. Вып. 11. С. 1—18.
7. Menon R., Rogge P., Hsin-Yu Tsai. Design of diffractive lenses that generate optical nulls without phase singularities // J. Opt. Soc. Am. A. 2009. V. 26. N 2. P. 297—304.
8. Тавров А. В. и др. Звездный коронограф по принципу ахроматического нуль-интерферометра // Космические исследования. 2011. Т. 49. Вып. 2. С. 105—116.

Дата принятия 19.03.2013 г.