

Датчик волнового фронта на основе фазового ножа

А.С.Гончаров, А.В.Ларичев

Предложено использовать оптическую систему с фазовым ножом для количественной регистрации формы волнового фронта оптического излучения. Проведены теоретические и численные исследования датчика на основе фазового ножа, разработаны алгоритмы восстановления фазовой функции и схемы реализации датчика, выявлена область целесообразного применения. Определены характеристики компонентов датчика, необходимые для его физической реализации, и экспериментально проверена работоспособность датчика при различных режимах работы.

Ключевые слова: абберация, фазовый нож, волновой фронт, пространственный спектр, фурье-оптика, визуализация фазовой функции, адаптивная оптика.

1. Введение

Без измерения профиля фазы световой волны невозможно решение многих исследовательских и прикладных задач, например задач оптической метрологии [1], адаптивной оптики [2], лазерной физики [3], офтальмологии [4] и т. д. Все методы фазовых измерений в оптике основаны на таком преобразовании исходного светового поля, в результате которого проявляется зависимость интенсивности света на фотоприемнике от искомой фазовой функции [1]. За прошедшие годы были предложены разнообразные методы, позволяющие качественно оценивать и измерять профиль волнового фронта. Наиболее популярны в настоящее время интерферометрические устройства, использующие когерентное сложение волн [1], и датчики типа Шака – Гартмана, в которых локальный наклон волнового фронта преобразуется в смещение пятен в фокусе линзового раstra [5]. Обладая многими преимуществами, упомянутые методы не свободны от недостатков, ограничивающих их область применения. Так, интерферометры весьма чувствительны к вибрации, требуют, чтобы когерентная опорная волна была неискаженной (за исключением сдвиговых интерферометров [6]), а процедура обработки интерферограмм достаточно сложна [7], и ее затруднительно выполнять в реальном масштабе времени. Динамический диапазон и пространственное разрешение датчика Шака – Гартмана жестко связаны с параметрами линзового раstra и не могут оперативно меняться при проведении измерений.

Точность измерений в обоих отмеченных методах значительно ухудшается при наличии амплитудной модуляции световой волны. Недостатки традиционных методов заставляют искать альтернативные подходы к решению проблемы измерения профиля волнового фронта.

В последнее время наиболее значительные успехи были достигнуты в создании датчиков кривизны волнового фронта [8], теневых приборов с использованием делительной пирамиды [9] и в модуляционно-спектральных методах восстановления фазы [10]. В датчиках кривизны используется возникновение локальной модуляции интенсивности при регистрации излучения с искривленным волновым фронтом вне плоскости зрачка. Это изменение связано с локальной кривизной волнового фронта, т. е. фактически зависит от второй производной по пространству. Следовательно, для восстановления профиля волнового фронта необходимо решать дифференциальное уравнение типа Лапласа (так называемое транспортное уравнение) с соответствующими граничными условиями, которые, как правило, неизвестны. На практике обычно регистрируют два распределения интенсивности, соответствующие плоскостям до и после плоскости зрачка. Это позволяет провести процедуру нормировки для уменьшения влияния амплитудной модуляции [8].

Датчик с пирамидальным светоделителем [10] является интересным развитием идеи теневого метода Фуко [11]. В этом датчике распределение света в фокальной плоскости разделяется четырехгранной пирамидой на четыре квадранта, излучение в пределах которых распространяется под небольшим углом к оптической оси и образует четыре изображения зрачка в плоскости фотодетектора. Каждое из этих изображений подобно картине, получаемой от ножа Фуко при его расположении справа, слева, сверху и снизу от оптической оси. Известно, что распределение интенсивности в картине Фуко пропорционально (в первом приближении) производной волнового фронта по пространству, поэтому процедура восстановления профиля волнового фронта аналогична применяемой для датчика Шака – Гартмана. Наличие четырех изображений позволяет провести их нормировку и в значительной мере уменьшить негативное влияние амплитудной модуляции интенсивности.

Заметим, что уменьшение влияния амплитудной модуляции во всех описанных методах достигается лишь за счет нормировки, и эффективность данной процедуры

А.С.Гончаров, А.В.Ларичев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: larichev@optics.ru; goncharov@bk.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2004 г., после доработки – 25 ноября 2004 г.

ограничена конечным отношением сигнал/шум фотодетектора и фотонными шумами. Интересным представляется создание датчика волнового фронта, в котором подавление амплитудной модуляции происходит уже в оптическом тракте. Кроме того, актуальна задача повышения чувствительности датчика при измерении малых деформаций волнового фронта.

В данной работе для регистрации формы волнового фронта предлагается использовать конфокальную четырехфокусную систему с фазовым ножом в качестве преобразователя пространственного спектра сигнала.

Фазовый нож как метод визуализации фазовых искажений известен уже довольно давно [12], однако его использование ограничивалось лишь качественной оценкой профиля фазовых искажений. Недавно была предложена модификация схемы с фазовым ножом [13], значительно улучшающая линейность преобразования фазы – интенсивность и позволяющая визуализировать первую производную фазовой функции. Было показано, что такая схема обладает малой чувствительностью к амплитудной модуляции входного излучения [14]. Однако этот метод по-прежнему остается лишь качественным.

В данной работе предложена и экспериментально исследована новая методика обработки изображений, получаемых с использованием фазового ножа, которая дает количественный результат и, следовательно, позволяет измерять распределение фазы световой волны.

2. Фазовый нож и обработка сигналов датчика

Классический фазовый нож представляет собой оптический элемент, разделяющий апертуру светового пучка на две части, излучение в пределах которых проходит различный оптический путь. Прямая граница между частями образует кромку ножа. Параметры устройства подобраны таким образом, что оптическая разность хода между световыми волнами, проходящими через фазовый нож по разные стороны кромки, составляет половину длины волны. Будучи размещенным в фокусе конфокальной четырехфокусной линзовой системы, такой оптический элемент работает как фазовый фурье-фильтр, преобразующий распределение фазы в распределение интенсивности.

Рассмотрим функционирование этого устройства, пользуясь аппаратом фурье-оптики (см. ниже рис.1). Световое поле на входе (плоскость A_1) представим в комплексном виде $A_{in}(x, y) = \rho(x, y) \exp(i\varphi(x, y))$, здесь $\rho(x, y)$ – амплитуда; $\varphi(x, y)$ – фаза входного сигнала; x и y – координаты в поперечном сечении пучка.

Как известно, линза в своём фокусе строит фурье-образ объекта, расположенного в её переднем фокусе. Таким образом, в плоскости ножа (плоскость A_2) сигнал имеет вид

$$U_{in}(\xi, \eta) = \int A_{in}(x, y) e^{-i(\xi x + \eta y)} dx dy = F\{A_{in}(x, y)\},$$

где координаты ξ и η , выраженные в единицах пространственной частоты, связаны с реальными координатами x и y как $\xi = 2\pi x/\lambda f$ и $\eta = 2\pi y/\lambda f$; f – фокусное расстояние линзы; λ – длина волны входного сигнала. Фазовый нож, как уже упоминалось, не меняя интенсивности сигнала, сдвигает по фазе одну часть спектра относительно вто-

рой на π . Таким образом, передаточная функция несмещенного ножа может быть записана как $H(\xi, \eta) = i \operatorname{sign}(\xi)$, а комплексная амплитуда после прохождения ножа (плоскость A_3) будет выражаться как $U_{out}(\xi, \eta) = U_{in}(\xi, \eta) H(\xi, \eta)$. Вторая линза осуществляет обратное преобразование Фурье, строя в плоскости A_4 изображение

$$\begin{aligned} A_{out} &= F^{-1}\{U_{out}(\xi, \eta)\} = F^{-1}\{U_{in}(\xi, \eta) i \operatorname{sign}(\xi)\} \\ &= A_{in}(x, y) \otimes (1/\pi x) = \frac{1}{\pi} \int \frac{A_{in}(x', y)}{x' - x} dx', \end{aligned}$$

где $1/\pi x = F\{i \operatorname{sign}(\xi)\}$. Таким образом, можно записать

$$A_{out}(x, y) = \mathcal{N}\{A_{in}(x, y)\}, \quad (1)$$

где $\mathcal{N}\{A_{in}(x, y)\}$ – преобразование Гильберта, эквивалентное для узкополосных сигналов операции взятия производной [10]. Следовательно, при постоянной интенсивности амплитуда на выходе системы будет пропорциональна производной фазовой функции $\varphi(x, y)$. Поскольку детекторы регистрируют интенсивность света, то реально можно измерить лишь квадрат производной.

Сделать систему чувствительной не только к амплитуде фазовых неоднородностей, но и к знаку локального наклона волнового фронта позволяет смещение кромки фазового ножа в поперечном направлении. При этом нулевая пространственная частота уже не будет подавляться за счет деструктивной интерференции, и интенсивность выходного сигнала будет пропорциональной производной фазового распределения.

Рассмотрим работу смещенного фазового ножа в случае гармонической фазовой модуляции и неограниченной апертуры. Представив фазовое распределение на входе в систему в виде $A_{in}(x) = \exp(ia_0 \cos(vx))$, мы можем записать

$$\begin{aligned} A_{in}(x) &= J_0(a_0) + 2iJ_1(a_0)\cos(vx) - 2J_2(a_0)\cos(2vx) \\ &\quad - 2iJ_3(a_0)\cos(3vx) + \dots, \end{aligned}$$

где $J_j(a_0)$ – функция Бесселя; $j = 0, 1, 2, \dots$. Пользуясь формулой (1) для несмещенного ножа, а также свойствами преобразования Гильберта [11], получаем

$$\begin{aligned} A_{out}(x) &= iJ_0(a_0) - 2iJ_1(a_0)\sin(vx) \\ &\quad + 2J_2(a_0)\sin(2vx) + 2iJ_3(a_0)\sin(3vx) - \dots, \end{aligned}$$

где, чтобы учесть сдвиг ножа, нулевую гармонику мы просто домножили на i . Вычисляя интенсивность сигнала по формуле $I_{out}(x, y) = |A_{out}(x, y)|^2$, получаем

$$\begin{aligned} I_{out} &= 1 - (4J_1J_0)\sin(vx) - (2J_1^2 + 4J_1J_3 + 2J_2J_4)\cos(2vx) \\ &\quad + (4J_3J_0)\sin(3vx) + (4J_1J_3 - 2J_2^2)\cos(4vx) - \dots \quad (2) \end{aligned}$$

При сравнительно малых глубинах модуляции фазы коэффициенты при появляющихся кратных частотах пренебрежимо малы, и зависимость выходной интенсивности от производной фазовой функции является практически линейной. Однако при увеличении амплитуды модуляции нелинейными членами уже пренебречь нельзя. Для

расширения диапазона линейной работы датчика применим следующий прием. Зарегистрируем распределения интенсивностей, полученные при смещении ножа по разные стороны нулевого порядка дифракции на одинаковую величину по обеим осям. Затем вычислим нормированный разностный сигнал по следующим формулам:

$$I_x(x, y) = \frac{I_{+\Delta x}(x, y) - I_{-\Delta x}(x, y)}{I_{+\Delta x}(x, y) + I_{-\Delta x}(x, y)}, \quad (3)$$

$$I_y(x, y) = \frac{I_{+\Delta y}(x, y) - I_{-\Delta y}(x, y)}{I_{+\Delta y}(x, y) + I_{-\Delta y}(x, y)}.$$

Здесь индексы $\pm\Delta x$, $\pm\Delta y$ обозначают распределения интенсивности, полученные со сдвигом ножа. Как нетрудно убедиться, такая обработка не только позволяет уменьшить влияние амплитудных флуктуаций за счет нормировки на суммарную интенсивность, но и уменьшает влияние нелинейности за счет устранения четных гармоник. Величины $I_x(x, y)$, $I_y(x, y)$ пропорциональны локальным наклонам волнового фронта $d\varphi/dx$, $d\varphi/dy$ соответственно. Далее, по измеренным локальным наклонам с использованием метода наименьших квадратов, восстанавливается распределение фазы [15]. Отметим, что, в отличие от широко распространенных датчиков волнового фронта Шака–Гартмана, пространственное разрешение устройства ограничено лишь числом элементов фотоприёмника.

3. Экспериментальная реализация датчика

Схема экспериментальной установки, созданной для исследования работы датчика, приведена на рис.1. За основу была взята конфокальная телескопическая система, работающая по автоколлимационному принципу. Полупроводниковый лазер 4, сопряженный с одномодовым волокном, использовался в качестве источника излучения. Излучение лазера заводилось в телескопическую систему посредством делительного кубика 3. Объектив 2 коллимировал это излучение. В фокальной плоскости объектива 2 было расположено биморфное деформируемое зеркало, изготовленное в лаборатории адаптивной оптики физического факультета МГУ. По конструкции зеркало было аналогично описанному в [16] и позволяло воспроизводить аберрации до 4-го порядка. Для управления зеркалом применялся контроллер 10, связанный с персональным компьютером 11. Отраженное от зеркала излучение проходило линзу 2 и делительный кубик 3 в обратном направлении и попадало на фазовый нож 5 (стеклянная пластина со ступенчатым профилем). Пла-

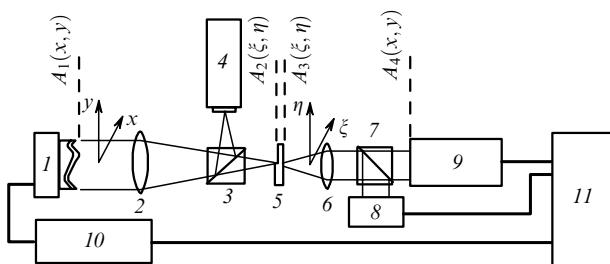


Рис.1. Схема датчика волнового фронта на основе фазового ножа: 1 – адаптивное зеркало; 2, 6 – линзы; 3, 7 – делительные кубики; 4 – лазер; 5 – фазовый нож; 8 – датчик Шака–Гартмана; 9 – CCD-камера; 10 – контроллер зеркала; 11 – ПК.

стина была установлена на микрометрической подвижке, которая позволяла задавать необходимые смещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы. Затем излучение коллимировалось линзой 6, причем диаметр пучка на выходе составлял 3 мм, что необходимо для сопряжения апертуры адаптивного зеркала с CCD-камерой 9, содержащей ПЗС-матрицу. Матрица ПЗС, имеющая размеры 6.8×4.8 мм и содержащая 720×570 точек, была расположена в фокальной плоскости линзы 6, в которой строилось уменьшенное изображение адаптивного зеркала. Сигнал с камеры подавался на ПК и оцифровывался платой видеозахвата Матрох МС с 8-битной точностью. Между линзой 6 и CCD-камерой 9 был установлен светоделительный кубик 7, направлявший часть излучения на датчик Шака–Гартмана 8, который состоял из линзового раstra с шагом 0.2 мм и фокусным расстоянием 5.2 мм и ПЗС-матрицы, аналогичной матрице камеры 9. Гартманогрaмма оцифровывалась при помощи того же ПК с точностью 8 бит. Программное обеспечение датчика позволяло восстанавливать профиль волнового фронта в виде разложения по 36 полиномам Цернике. Среднеквадратичная погрешность измерений была менее 0.04 мкм.

4. Работа датчика с точечным опорным источником

Работа датчика с точечным опорным источником исследовалась экспериментально и численно. При обработке сигналов с датчика использовалась центральная часть апертуры с диаметром 0.8 от общей апертуры пучка, что было необходимо для исключения влияния краевых эффектов. На этой области формировалась сетка с квадратными ячейками. Интенсивность в узлах сетки вычислялась путем усреднения интенсивности по квадратной области с центром в узле сетки и размером, равным шагу сетки. В экспериментах использовалась сетка 20×20 .

Численное моделирование проводилось в параболическом приближении теории дифракции с помощью преобразования Фурье. При расчете принималось, что сетка содержит 512×512 элементов, что близко к разрешению ПЗС-матрицы, используемой в экспериментах. Шум датчика моделировался добавлением некоррелированного шума с гауссовым распределением к вычисленным значениям интенсивности на выходе датчика. Дисперсия шума соответствовала пуассоновской статистике фотоотчетов и глубине потенциальной ямы в 40000 фотоэлектронов. Затем полученная картина обрабатывалась по той же методике, что и картина с ПЗС-датчика в эксперименте.

Фазовые искажения моделировались путем подачи различных напряжений на электроды зеркала. Результирующий фазовый профиль контролировался с помощью датчика Шака–Гартмана, который был предварительно откалиброван с использованием прецизионного углового дефлектора и опорного зеркала высокого оптического качества.

Пример восстановления карты аберраций датчиком с фазовым ножом приведен на рис.2. Здесь также приведены результаты численного моделирования, причем входное фазовое распределение соответствует коэффициентам Цернике, измеренным при помощи датчика Шака–Гартмана. Как нетрудно увидеть, восстановленная и рассчитанная карта практически совпадают, что свиде-

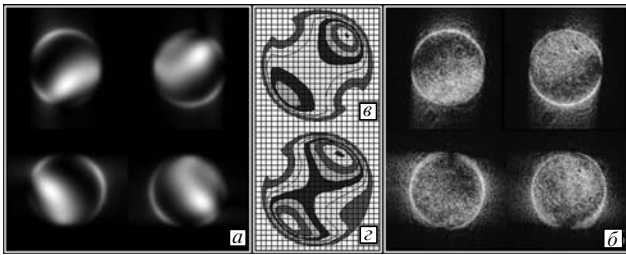


Рис.2. Выходные изображения с датчика, полученные путём численного моделирования (а) и в результате эксперимента (б), а также восстановленный волновой фронт при моделировании (с) и при экспериментальной реализации (д).

тельствует об адекватности модели датчика. Небольшое различие объясняется тем, что собственные aberrации линзы б практически не влияют на сигнал датчика с фазовым ножом (нож установлен до этой линзы), тогда как датчик Шака–Гартмана измеряет полные aberrации с учётом этой линзы.

Зависимости на рис.3 также иллюстрируют хорошее совпадение передаточной функции датчика, полученной численным моделированием и экспериментально. Передаточная функция была найдена для астигматизма, при этом в эксперименте управляющее напряжение на зеркале плавно менялось, а амплитуда исходной фазовой модуляции измерялась с помощью датчика Шака–Гартмана. Видно, что заметные различия в передаточных функциях появляются при фазовой модуляции, равной примерно 1.5 длины волны, что уменьшает динамический диапазон датчика приблизительно на 25%. Однако в рабочем диапазоне линейность передаточной характеристики сохраняется.

Рассмотрим влияние амплитудной модуляции на работу датчика. В эксперименте амплитудная модуляция создавалась шпальной мирой, расположенной вблизи грани делительного кубика 3 со стороны лазера. Мира имела 100%-ную модуляцию пропускания. При численном моделировании соответствующая амплитудная модуляция задавалась на входе датчика (в плоскости A_1 , см. рис.1). Результат восстановления профиля фазы при наличии амплитудной модуляции показан на рис.4, в, г. На рис.4, а приведено распределение интенсивности в плоскости адаптивного зеркала, в которой модуляция интенсивности несколько меньше 100% за счет дифракционных эффектов. Из рис.4 видно, что модуляция интенсивности

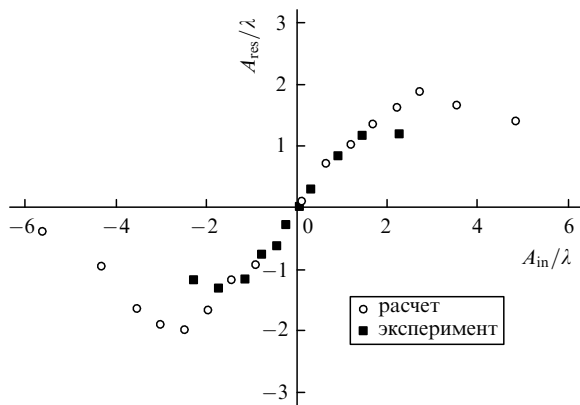


Рис.3. Зависимости амплитуды восстановленной фазовой функции A_{res} от исходной A_{in} , заданной вторым полиномом Цернике (астигматизм); λ – длина волны излучения.

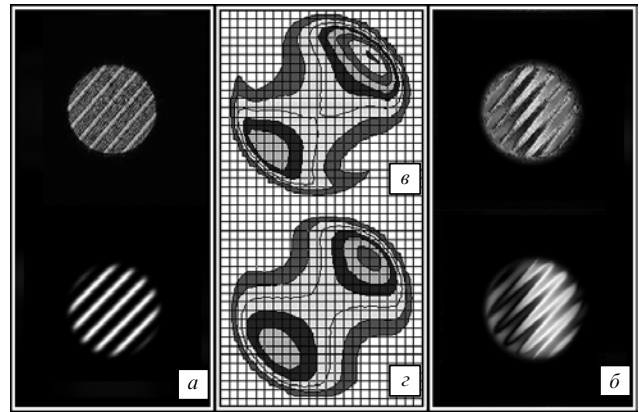


Рис.4. Интенсивности в сечении пучка (а) и изображения, полученные на выходе датчика (б), а также восстановленный волновой фронт в проведённом эксперименте (в) и в компьютерной модели датчика (г) при работе датчика с пучком со 100%-ной модуляцией интенсивности в своём сечении.

ности не вносит существенных искажений в восстановленный профиль фазы.

Поскольку плавно варьировать величину амплитудной модуляции в эксперименте было затруднительно, характеристики датчика для различной величины амплитудной модуляции были получены численно. На рис.5, а показана кривая передачи модуляции для датчика с фазовым ножом, для сравнения там же приведена кривая передачи модуляции для ножа Фуко. При построении обеих зависимостей нормировка интенсивности по формулам (3) не проводилась. Хорошо видно, что для фазового ножа 50%-ная модуляция амплитуды практически полностью подавляется, тогда как в случае ножа Фуко этого не происходит.

Для оценки влияния амплитудной модуляции на точность измерения профиля фазы был проведен численный эксперимент, в котором амплитудная модуляция задавалась в виде случайной комбинации 36 полиномов Цер-

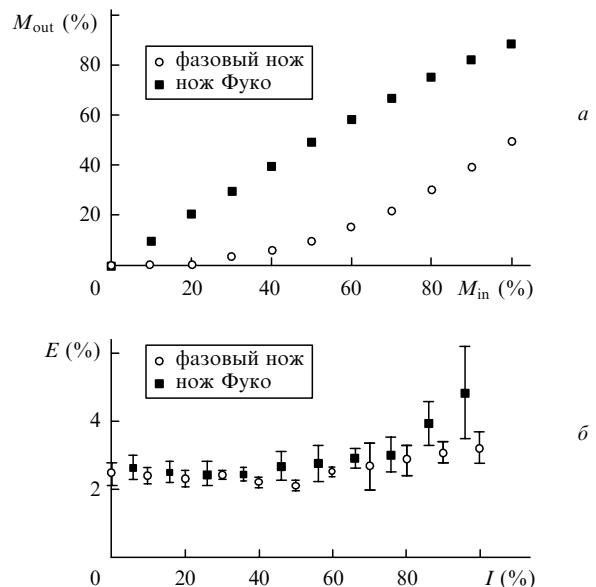


Рис.5. Зависимости модуляции амплитуды на выходе из системы M_{out} от её модуляции на входе M_{in} (а) и зависимость ошибки восстановления волнового фронта в процентах амплитуды входной фазовой модуляции E от амплитуды модуляции интенсивности входного сигнала I .

нике (рис.5,б). Поскольку и фазовые искажения за- давались в виде полиномов Цернике (для данного экс- перимента это была кома с амплитудой 2.5 рад), то такой случай был наиболее неблагоприятным для работы дат- чика. Для каждого значения модуляции проводилось 10 испытаний, результаты которых усреднялись. Видно, что даже при больших флуктуациях интенсивности погреш- ность имеет небольшое значение, что следует отнести к достоинствам алгоритма нормировки (3). Можно заме- тить, что при высоких уровнях амплитудной модуляции погрешность восстановления для ножа Фуко заметно ра- стет, тогда как для фазового ножа этот рост незначи- телен. Такого поведения можно было ожидать исходя из вида амплитудных модуляционных кривых. Для фазово- го ножа даже при 100 %-ной модуляции амплитуды на входе модуляция на выходе не превышает 50 %, что не нарушает эффективность процедуры нормировки.

5. Работа датчика с распределённым источником

До сих пор мы рассматривали случай, когда при отсутствии фазовых искажений изображение источника на фазовом ноже является дифракционно ограниченным (т. е. представляет собой диск Эйри с угловым размером, определяемым диаметром входной апертуры). Однако во многих практических важных задачах источник излу- чения не является точечным и пространственно когерент- ным, т. е. его изображение в плоскости ножа заметно больше диска Эйри (см. рис. 1). Напомним, что фазовый нож визуализирует лишь те пространственные частоты, спектральные компоненты которых лежат по обе сторо- ны ножа. Для пространственно некогерентного источни- ка каждая точка источника (вернее, когерентная область) независимо обрабатывается фазовым ножом, и затем по- лученные сигналы некогерентно складываются на фото- приемнике.

Фазовые искажения с угловым размером, меньшим, чем угловой размер источника, одинаково хорошо визу- ализируются для всех точек источника; фазовые искаже- ния с большим угловым размером визуализируются только в малой области источника, остальная область создает лишь равномерный фон. Таким образом, если ис- точник имеет равную яркость и размер в направлении, параллельном кромке ножа, то амплитуда визуализиро- ванных искажений линейно растет с пространственной частотой. Этот эффект создает необходимый для полу- чения точной производной частотный множитель перед гильберт-образом (см. (1)). Можно ожидать, что с рас- пределенным источником диапазон линейного отклика датчика возрастет, причем чем большим будет угловой размер источника, тем для более широкого спектра фа- зовых искажений эта зависимость будет сохраняться.

В реальности угловой размер источника ограничен областью изопланатизма для данных фазовых искаже- ний; кроме того, рост фоновой засветки будет затруднять регистрацию изображений на выходе датчика (умень- шать отношение сигнал/шум).

В экспериментах для создания распределенного ис- точника на место полупроводникового лазера был уста- новлен светодиод (пиковая длина волны 650 нм). Пла- стиковая линза диода была удалена, и торец корпуса от- полирован до оптического качества. Размер квадратной светоизлучающей площадки диода составлял приблизи-

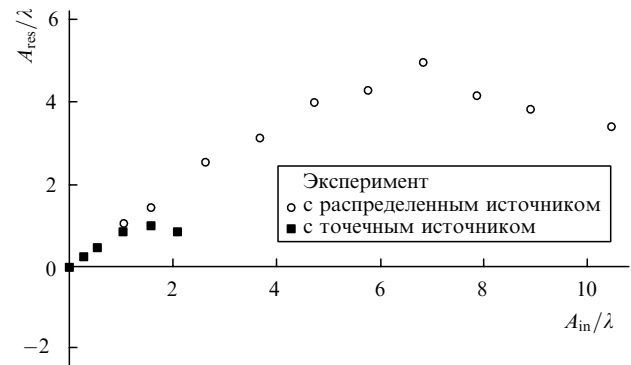


Рис.6. Зависимости амплитуды восстановленной фазовой функции A_{res} от исходной A_{in} , заданной вторым полиномом Цернике (ас- тигматизм); λ – длина волны излучения.

тельно 1.5 мм, что соответствовало угловому размеру 30". На рис.6 приведена зависимость амплитуды восста- новленной фазы от амплитуды фазовой модуляции на входе датчика. Параметры эксперимента те же, что и для случая амплитудной модуляции. Хорошо видно, что ди- апазон линейной работы датчика в эксперименте с рас- пределённым источником более чем в 5 раз превысил аналогичный диапазон в эксперименте с точечным ис- точником.

Можно предположить, что для определенных поряд- ков aberrаций будет существовать оптимальный угло- вой размер источника, поскольку при увеличении раз- мера источника ухудшается отношение сигнал/шум, но, с другой стороны, при малых размерах источника нару- шается линейность зависимости визуализированной про- изводной от пространственной частоты. На рис.7 пред- ставлены полученные численно зависимости среднеква- дратичной ошибки восстановления для aberrаций раз- личных порядков от угловых размеров источника. Хоро- шо видно, что для aberrаций низких порядков (третьего и пятого) оптимальный размер источника должен быть достаточно малым (приблизительно 20"), тогда как для aberrаций более высокого порядка (седьмой поряд- ковым полиномом Цернике) имеется явно выраженный мини- мум для углового размера источника 100". Это означает, что на практике оптимальный размер источника должен выбираться исходя из пространственных характеристик измеряемых aberrаций. В случаях, когда нет возможно-

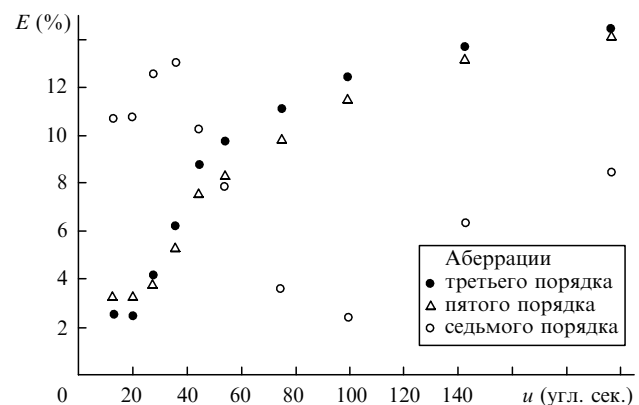


Рис.7. Зависимости ошибки восстановления волнового фронта в процентах амплитуды входной фазовой модуляции E от углового размера распределённого опорного источника u при учёте aberrаций третьего, пятого и седьмого порядков.

сти варьировать размер источника, например в задачах дистанционного зондирования, возможно применение специально рассчитанных фазовых экранов [17] для формирования необходимого распределения на фазовом ноже.

6. Заключение

Анализ полученных данных показывает, что датчик волнового фронта с фазовым ножом имеет несколько преимуществ перед традиционными методами измерения фазы. Это, в первую очередь, малая чувствительность к пространственной амплитудной модуляции исследуемого излучения. Преимущества датчика особенно очевидны в случае малоэффективной процедуры нормировки интенсивности, т. е. в режиме малых интенсивностей, когда велики фотонные шумы фотоприемника, и в режимах с большой амплитудой модуляции. По сравнению с датчиком волнового фронта на основе ножа Фуко [10] чувствительность предложенного устройства в 2 раза больше, поэтому датчик на основе фазового ножа будет иметь преимущество при измерении малых фазовых искажений.

При практической реализации устройства, естественно, нет необходимости механически смещать фазовый нож в фокальной плоскости, как это было сделано в эксперименте. Более рациональным является формирование четырех мультиплицированных изображений источника при помощи дифракционных решеток. Тогда все четыре изображения зрачка могут быть одновременно построены на одном ПЗС-датчике, как это сделано в датчике с делительной пирамидой [10].

К недостаткам датчика следует отнести относительную сложность этого устройства. Однако с применением

современных технологий фотолитографии и пластиковой репликации возможно достаточно экономичное изготовление необходимых оптических элементов.

Авторы благодарят В.И.Шмальгаузену за ценные предложения и замечания и Н.Г.Ирошникову за помощь в реализации программного обеспечения. Работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-02-16876-а).

1. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д.Малакара (М.: Машиностроение, 1985).
2. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. *Управляемые оптические системы* (М.: Наука, 1988).
3. Baumhacker H., Pretzeler G., Witte K.J., Hegelich M., Kaluza M., Karsch S., Kudryashov A., Samarkin V., Rukosuev A. *Opt. Lett.*, **27** (17), 1570 (2002).
4. Liang J., Grimm B., Goelz S., Bille J.F. *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**, 1949 (1994).
5. Platt B., Shack R.V. *Opt. Sci. Center News*, **5** (1), 15 (1971).
6. Шехтман В.Н., Родионов А.Ю., Пельменев А.Г. *Оптика и спектроскопия*, **79** (1), 134 (1995).
7. Malacara D., Servin M., Malacara Z. *Interferogram Analysis for Optical Testing* (New York: Marcel Dekker, 1998).
8. Blanchard Paul M., Fisher David J., Woods Simon C., Greenaway Alan H. *Appl. Opt.*, **39** (35), 6649 (2000).
9. Ragazzoni R. *J. Mod. Opt.*, **43**, 189 (1996).
10. Зелепукина Е.В., Зубов В.А., Меркин А.А., Миронова Т.В. *Оптика и спектроскопия*, **93** (5), 814 (2002).
11. Сороко Л.М. *Гильберт-оптика* (М.: Наука, 1981).
12. Lowenthal S., Belvaux Y. *Appl. Phys. Lett.*, **11** (2), 49 (1967).
13. Larichev A.V., Nikolaev I.P., Costamagna S., Violino P. *Opt. Commun.*, **121**, 95 (1995).
14. Нестерук К.С., Николаев И.П., Ларичев А.В. *Оптика и спектроскопия*, **91** (2), 320 (2001).
15. Southwell W.H. *J. Opt. Soc. Am. A*, **70**, 998 (1980).
16. Dainty J.C., Koryabin A.V., Kudryashov A.V. *Appl. Opt.*, **37**, 4663 (1998).
17. Ragazzoni R., Diolaiti E., Vernet E. *Opt. Commun.*, **208**, 51 (2002).