



ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО НОЖА

Гончаров А.С., Ларичев А.В.

Московский Государственный Университет им. Ломоносова.

Физический Факультет.



Аннотация: В работе предложено использовать оптическую систему с фазовым ножом для количественной регистрации формы волнового фронта оптического излучения. Проведены теоретическое и численное исследование датчика на основе фазового ножа, разработаны алгоритмы восстановления фазовой функции и схемы реализации датчика, выявлена область целесообразного применения. Определены необходимые характеристики компонентов датчика для его физической реализации и экспериментально проверена работоспособность датчика при различных режимах работы.

Ключевые слова: aberrация, фазовый нож, волновой фронт, распределённый источник, 4-f система, пространственный спектр, фурье-оптика, визуализация фазовой функции, адаптивная оптика.

ЦЕЛЬ

Измерение профиля фазы световой волны необходимо во многих исследовательских и прикладных задачах, таких как оптическая метрология [1], адаптивная оптика [2], лазерная физика [3], офтальмология [4] и т.д. Все методы фазовых измерений в оптике основаны на таком преобразовании исходного светового поля, в результате которого появляется 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 популярными в настоящее время являются 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 неискаженную когерентную опорную волну, а процедура обработки интерферограмм достаточно сложна [6], 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 данной работе для регистрации формы волнового фронта предлагается использовать конфокальную 4-f систему с фазовым ножом в качестве преобразователя пространственного спектра сигнала.

Фазовый нож, как метод визуализации фазовых искажений известен уже довольно давно [7], однако его использование ограничивалось лишь качественной оценкой профиля фазовых искажений. Недавно была предложена модификация схемы с фазовым ножом [8] значительно улучшающая линейность преобразования «фаза-интенсивность» и позволяющая визуализировать первую производную фазовой функции. Было показано, что такая схема обладает малой чувствительностью к амплитудной модуляции входного излучения [9]. Однако этот метод по-прежнему оставался лишь качественным.

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

МЕТОДЫ

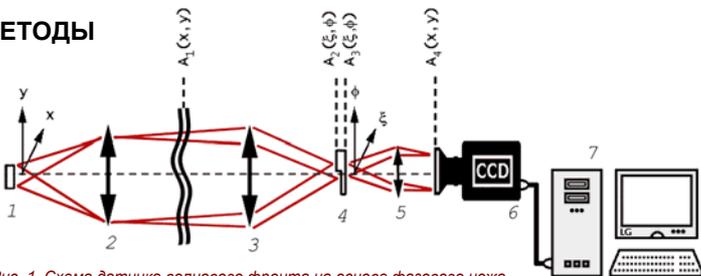


Рис. 1. Схема датчика волнового фронта на основе фазового ножа.

1 – распределённый источник; 2, 3, 5 – линзы; 4 – фазовый нож; 6 – CCD-камера; 7 – ПК.

$$A_1: A_{in}(x, y) = \rho(x, y) \exp(i\varphi(x, y))$$

$$A_2: U_{in}(\xi, \eta) = \int A_{in}(x, y) e^{-i(\xi x + \eta y)} dx dy = F\{A_{in}(x, y)\}$$

$$H(\xi, \eta) = i \cdot \text{sign}(\xi - B); \quad B = \frac{2\pi d}{\lambda f}$$

$$A_3: U_{out}(\xi, \eta) = U_{in}(\xi, \eta) H(\xi, \eta)$$

$$A_4: A_{out}(x, y) = F^{-1}\{U_{out}(\xi, \eta)\} = \frac{1}{\pi} \int \frac{A_{in}(x', y)}{x' - x} e^{i(x' - x)B} dx'$$

Приближение малых модуляций: $\{A_{in}(x, y) = 1 + i\varphi(x, y)\}$

Разложение Неймана: $\{A_{in}(x) = \exp(i a_0 \cos(x))\}$

$$I_{out} = 1 \pm 2N\{\varphi_B(x, y)\} + \varphi_B^2(x, y)$$

$$N\{\sin(x)\} = \cos(x); \quad N\{\cos(x)\} = -\sin(x);$$

$$I_{out} = 1 - 4J_1 J_0 \sin(vx) - (2J_2^2 + 4J_1 J_2 + 2J_2^2) \cos(2vx) + 4J_3 J_0 \sin(3vx) + (4J_1 J_3 - 2J_2^2) \cos(4vx) - \dots$$

ОБРАБОТКА ВЫХОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

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



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

$$I_{out} = 4N\{\varphi_B(x, y)\}$$

$$I_{out} = -8J_1 J_0 \sin(vx) + 8J_3 J_0 \sin(3vx) + \dots$$

$$I_x(x, y), I_y(x, y) \sim d\varphi/dx, d\varphi/dy$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

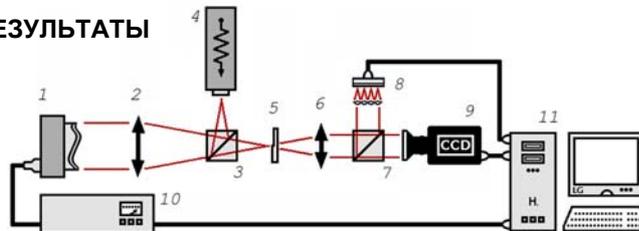


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

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.

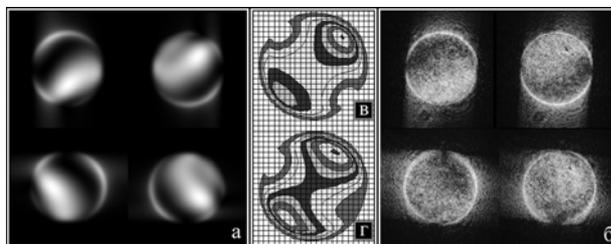


Рис. 3. Четыре выходных изображения с датчика, полученные путём численного моделирования (а) и в результате эксперимента (б), восстановленный волновой фронт при моделировании (в) и при экспериментальной реализации (г).

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В СЕЧЕНИИ ПУЧКА

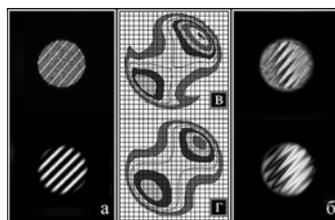


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования при работе датчика с пучком со 100%-ной модуляцией интенсивности. Сечения пучка (а), изображения на выходе датчика (б) и восстановленный волновой фронт в эксперименте (в) и в компьютерной модели (г).

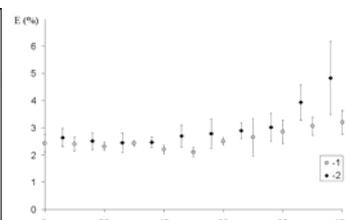
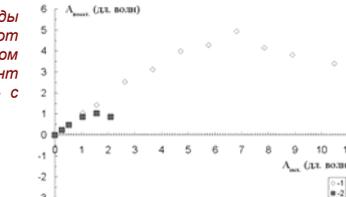


Рис. 5. Ошибка восстановления волнового фронта (E) в зависимости от амплитуды модуляции интенсивности входного сигнала (I). Кривая 1 – для датчика с фазовым ножом, Кривая 2 – с ножом Фуко.

РАБОТА ДАТЧИКА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ НЕКОГЕРЕНТНЫМ ИСТОЧНИКОМ СВЕТА

Рис. 7. Зависимость амплитуды восстановленной фазовой функции (A_восст.), от исходной (A_исх.), заданной вторым полиномом Цернике (астигматизм). Кривая 1 – эксперимент с распределённым источником, кривая 2 – с точечным.



ВЫВОДЫ

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 случаях, когда процедура нормировки интенсивности оказывается мало эффективной, то есть 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], предложенное устройство имеет в 2 раза большую чувствительность. Поэтому, датчик на основе фазового ножа будет иметь преимущество при измерении малых фазовых искажений.

К недостаткам датчика следует отнести относительную сложность изготовления этого устройства. Однако, с применением современных технологий фотолитографии и пластиковой репликации возможно достаточно экономичное изготовление необходимых оптических элементов.

* Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16876-а)

[1]. Оптический производственный контроль/ под ред. Малакары Д., М.: Машиностроение, 1985г. 400с.
[2]. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. Управляемые оптические системы. М. Наука, 1988.
[3]. H. Baumhacker, G. Pretzler, K. J. Witte et al. Opt. Lett. 27(17), pp. 1570-1572, 2002.
[4]. Liang J., Grimm B., Goetzl S. and Bille J.F., J. Opt. Soc. Am. A. 11, 1949-1957 (1994).
[5]. Platt, B. and Shack, R.V., Opt. Sci. Center News, 1971. 5(1): p. 15-16
[6]. Malacara, D., Servin, M., Malacara, Z., Interferogram Analysis for Optical Testing, Marcel Dekker, N.Y., 1998.
[7]. Lowenthal S. and Belvaux Y. Appl. Phys. Lett. 1967. V.11. №2. P.49.
[8]. Larichev A.V., Nikolaev I.P., Costamagna S., and Violino P. // Opt. Comm. 1995. V.121. P.95.
[9]. Неструк К.С., Николаев И.П., Ларичев А.В. Отт. и спектр. - 2001. - Т.91, N2. - С.320-325.
[10]. Ragazzoni R., J. of Mod. Optics 43, pp 189-193(1996).