

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

# Голографический модовый датчик волнового фронта с увеличенным числом измеряемых мод

В.В.Орлов

*Предложен голографический модовый датчик волнового фронта, позволяющий измерять десятки мод волнового фронта. Увеличение числа измеряемых мод достигается преобразованием входящей в датчик световой волны в широкий диффузный пучок света, что дает возможность записать большое число голограмм, каждая из которых предназначена для измерения одной из мод.*

**Ключевые слова:** голографический датчик волнового фронта, адаптивная оптика, наложенные фурье-голограммы, корреляционная обработка сигналов.

## 1. Введение

Датчики волнового фронта служат для измерения формы волнового фронта световой волны и используются в адаптивной оптике, в офтальмологии и в некоторых других областях. В настоящее время широко применяется датчик Шака–Гартмана [1], который измеряет величины, относящиеся к отдельным участкам волнового фронта, и поэтому принадлежит к зональному виду датчиков. Обработка сигналов датчика Шака–Гартмана занимает слишком много времени, чтобы его можно было использовать в адаптивной оптике для измерения искажений волнового фронта, вызванных турбулентностью атмосферы, частота изменений которых достигает уровня близкого к килогерцовому. Этот недостаток присущ всем зональным датчикам, например датчику кривизны [2].

Ведется также разработка датчиков, измеряющих амплитуды мод волнового фронта, где каждая мода описывает весь волновой фронт [3–6]. Такие датчики способны обеспечить более высокую скорость измерения волнового фронта, которая достаточна для измерения искажений, вызванных турбулентностью атмосферы. Однако на пути создания модового датчика стоят две проблемы. Одна из них – это межмодовые перекрестные помехи, возникающие, когда форма волнового фронта описывается более чем одной модой, вторая – это недостаточно большое число измеряемых датчиком мод. В настоящей работе предложен голографический модовый датчик волнового фронта, позволяющий измерять десятки мод волнового фронта, что существенно превышает число мод, которые могут быть измерены ранее предложенными модовыми датчиками.

## 2. Схема и принцип работы датчика

В состав датчика входит матрица голограмм, где каждая голограмма состоит из двух наложенных фурье-

голограмм и обеспечивает измерение одной из мод волнового фронта. Матрица голограмм записывается с использованием рассеивателя и линзы, выполняющей фурье-преобразование. Схема записи матрицы голограмм представлена на рис.1. В передней фокальной плоскости линзы Л1 установлен рассеиватель Р, в задней фокальной плоскости расположена регистрирующая среда С, служащая для записи голограмм. Перед регистрирующей средой установлена подвижная диафрагма Д1, выделяющая участок среды, на котором записывается одна из голограмм матрицы. На рассеиватель Р по нормали падает плоская волна, фаза которой модулирована одной из мод волнового фронта, например модой, задаваемой полиномами Цернике. Диффузный пучок света, образующийся в задней фокальной плоскости линзы Л1, используется как опорная волна для записи голограммы на выделенном диафрагмой Д1 участке регистрирующей среды С. Объектной волной голограммы служит плоская волна, падающая на регистрирующую среду С под углом  $\theta_1$ . На этом же участке среды С записывается вторая голограмма, когда на рассеиватель Р падает волна, модулированная той же самой модой, но с фазой противоположного знака. Объектной волной служит вторая плоская волна, падающая на среду С под углом  $\theta_2$ . Затем диафрагма Д1 смещается на другой участок регистрирующей среды и

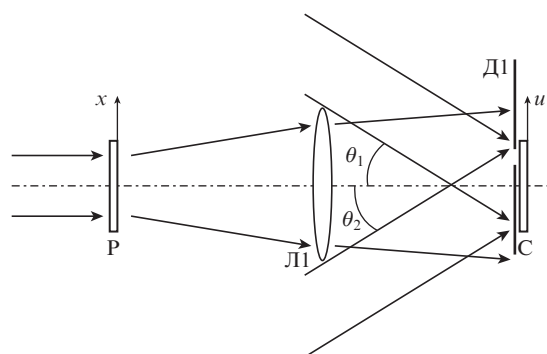


Рис.1. Схема записи матрицы голограмм: Р – рассеиватель, установленный в передней фокальной плоскости линзы Л1; Д1 – подвижная диафрагма; С – регистрирующая среда для записи матрицы голограмм, расположенная в задней фокальной плоскости линзы.

**В.В.Орлов.** Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: orlov4v8v@yandex.ru

Поступила в редакцию 10 марта 2017 г., после доработки – 6 июня 2017 г.

повторяется запись двух наложенных голограмм с фазовой модуляцией опорной волны, задаваемой другим полиномом Цернике. Аналогичным образом в пределах диффузного пучка записываются остальные голограммы, составляющие матрицу голограмм М (рис.2), где каждая голограмма матрицы М состоит из двух наложенных голограмм.

Схема датчика представлена на рис.2. Кроме рассеивателя Р, линзы Л1 и матрицы голограмм М она содержит два растра микролинз Т, в линзы которых поступают объектные волны голограмм, восстанавливаемые при поступлении в датчик измеряемой волны, падающей по нормали на рассеиватель Р. В задних фокальных плоскостях линз установлены диафрагмы Д2, пропускающие волны, которые локализованы в окрестности оптических осей линз, за диафрагмами расположены фотоприемники Ф, измеряющие интенсивности волн.

Рассмотрим запись и восстановление одной из голограмм матрицы голограмм М. Пусть на рассеиватель Р с амплитудным пропусканием  $p(x)$  падает по нормали плоская волна, фаза которой модулирована полиномом Цернике  $Z_l(x)$  с амплитудой модуляции  $\beta_l$ . Комплексная амплитуда волны, прошедшей через рассеиватель, имеет вид

$$R_{1l}(x) = ap(x)\exp[i2\pi\beta_l Z_l(x)], \tag{1}$$

где  $a$  – амплитуда падающей волны. В задней фокальной плоскости линзы Л1, в плоскости записи голограммы, возникает фурье-образ волны  $R_{1l}(x)$ :

$$F_1[R_{1l}(x)] = R_{1lf}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{1l}(x)\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda f_1}ux\right)dx, \tag{2}$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $a f_1$  – фокусное расстояние линзы Л1. Опорная волна  $R_{1lf}(u)$  интерферирует с плоской объектной волной  $b \exp(ik_1 u)$  ( $k_1$  – волновое число), падающей на регистрирующую среду под углом  $\theta_1$  (рис.1). В плоскости записи голограммы возникает интерференционная картина с интенсивностью

$$J_{1l}(u) = |R_{1lf}(u) + b \exp(ik_1 u)|^2 \text{rect}\left(\frac{u-u_0}{d}\right), \tag{3}$$

где  $u_0$  – координата центра голограммы, а  $d$  – ее ширина, равная ширине диафрагмы Д1. На этом же участке регистрирующей среды записывается вторая голограмма, с плоской объектной волной  $b \exp(ik_2 u)$ , падающей под углом  $\theta_2$  (рис.1), и опорной волной, полученной при паде-

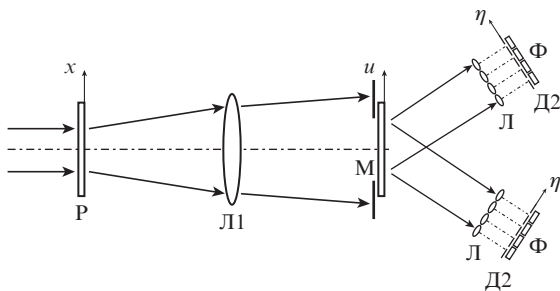


Рис.2. Схема датчика волнового фронта; Р – рассеиватель; Л1 – линза; М – матрица голограмм; Л – растр микролинз; Д2 – диафрагмы, установленные в фокальных плоскостях микролинз; Ф – фотоприемники.

нии на рассеиватель Р волны  $R_{2l}(x) = ap(x)\exp[-i2\pi\beta_l Z_l(x)]$ , которая, следуя [3], отличается от волны (1) противоположным знаком фазовой модуляции. В результате записываются две наложенных голограммы, амплитудное пропускание которых пропорционально сумме интенсивностей:

$$t(u) \propto J_{1l}(u) + J_{2l}(u), \tag{4}$$

где  $J_{2l}(u)$  – распределение интенсивности при записи второй голограммы. Всего на разных участках регистрирующей среды с  $N$  разными полиномами Цернике записывается  $N$  таких голограмм, составляющих матрицу голограмм М (см. рис.2).

Предположим, что в датчик поступает измеряемая волна  $\psi(x)$ , содержащая как моду  $Z_l(x)$  с амплитудой  $\alpha_l$ , так и другие моды Цернике с амплитудами  $\gamma_n$ ,

$$\psi(x) \propto \exp\left\{i2\pi\left[\alpha_l Z_l(x) + \sum_{n=1, n \neq l}^N \gamma_n Z_n(x)\right]\right\}. \tag{5}$$

Пройдя через рассеиватель Р, волна  $\psi(x)$  в задней фокальной плоскости линзы Л1 принимает вид

$$\psi_f(u) = F_1[p(x)\psi(x)] \tag{6}$$

и, падая на наложенные голограммы, восстанавливает объектные волны голограмм, что описывается произведением  $t(u)\psi_f(u)$ . Восстановленная объектная волна первой наложенной голограммы имеет вид

$$O_{1lf}(u) \propto \exp(ik_1 u) R_{1lf}^*(u) \psi_f(u) \text{rect}\left(\frac{u-u_0}{d}\right). \tag{7}$$

Упростим выражение (7), исключив экспоненту, учитывающую распространение объектной волны под углом  $\theta_1$  к оптической оси датчика. Волна  $O_{1lf}(u)$ , распространяясь, падает на соответствующую ей линзу растра микролинз Л. В фокальной плоскости линзы возникает ее фурье-образ

$$O_{1L}(\eta) \propto F_2\left[R_{1lf}^*(u) \psi_f(u) \text{rect}\left(\frac{u-u_0}{d}\right)\right], \tag{8}$$

зависящий от фокусного расстояния линз растра. Обозначим через  $q$  отношение фокусного расстояния линзы Л1 к фокусному расстоянию линз растра микролинз. Выполним необходимые математические преобразования, получим

$$\begin{aligned} O_{1L}(\eta) &\propto F_2[R_{1lf}^*(u) \psi_f(u)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} p^*(q\xi) \exp[-i2\pi\beta_l Z_l(q\xi)] p[q(\xi - \eta)] \\ &\times \exp\left(i2\pi\left\{\alpha_l Z_l[q(\xi - \eta)] + \sum_{n=1, n \neq l}^N \gamma_n Z_n[q(\xi - \eta)]\right\}\right) d\xi. \end{aligned} \tag{9}$$

Выражение (9) представляет собой функцию взаимной корреляции двух функций, одна из которых входит в (9) с аргументом  $q\xi$ , другая с аргументом  $q(\xi - \eta)$ . Отметим, что схема датчика (рис.2) близка к схеме коррелятора Ван дер Люгта [7], а принцип работы датчика близок к методам голографического вычитания [8] и обнаружения

[9, 10] общих фрагментов изображений. Чтобы излишне не усложнять выражение (9), из него исключена функция  $\text{rect}[(u - u_0)d^{-1}]$ , учитывающая ширину  $d$  голограммы. Наличие этой функции приводит к свертке правой части равенства (9) с фурье-образом от этой функции.

Ширина корреляционного пика функции взаимной корреляции (9) при использовании рассеивателя меньше, чем она была бы при его отсутствии, когда  $p(x) = 1$ . Использование рассеивателя приводит к возникновению шума, характерного для голограмм с протяженным опорным источником, или, как их еще называют, голограмм с кодированным опорным пучком. У таких голограмм интенсивность шума равна интенсивности сигнала, где сигналом является корреляционный пик, а шумом – широкое плато автокорреляционной функции опорного источника [7, 11]. Поскольку число голограмм, записанных с протяженным опорным источником, равно  $2N$ , в плоскости матрицы голограмм  $M$  отношение интенсивности сигнала от любой из наложенных голограмм к интенсивности шума, создаваемого всеми голограммами, не превышает  $1/2N$ . Существенно, что ширина спектра пространственных частот шума в два раза превышает ширину спектра пространственных частот диффузной опорной волны [7]. Поэтому шум рассеивается и подавляющая его часть блокируется диафрагмами  $D2$  (см. рис.2).

Амплитуда корреляционного пика в его максимуме, на оптической оси, при  $\eta = 0$ :

$$O_{1L}(0) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} |p(q\xi)|^2 \times \exp \left\{ i2\pi \left[ (\alpha_l - \beta_l) Z_l(q\xi) + \sum_{n=1, n \neq l}^N \gamma_n Z_n(q\xi) \right] \right\} d\xi. \quad (10)$$

Рассмотрев аналогичным образом восстановление объектной волны второй наложенной голограммы, получим, что ее амплитуда в фокальной плоскости на оптической оси линзы раstra микролинз

$$O_{2L}(0) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} |p(q\xi)|^2 \times \exp \left\{ i2\pi \left[ (\alpha_l + \beta_l) Z_l(q\xi) + \sum_{n=1, n \neq l}^N \gamma_n Z_n(q\xi) \right] \right\} d\xi. \quad (11)$$

Сравнивая выражения (10), (11) с выражениями для сигналов других модовых датчиков волнового фронта, использующих предложенную в работе [3] модуляцию измеряемой волны (например, с выражениями работ [5, 12]), можно видеть, что имеет место одинаковая зависимость сигналов как от измеряемой моды, так и от межмодовых перекрестных помех, в качестве которых в (10), (11) выступают моды, расположенные за символом суммирования. Различные методы обработки сигналов (10), (11) рассмотрены в работе [13].

Число голограмм, которое может содержать матрица голограмм, т.е. число измеряемых мод, зависит от площади той части диффузного пучка в фокальной плоскости линзы  $L1$ , которая содержит все пространственные частоты мод. Диаметр диффузного пучка в фокальной плоскости линзы равен  $D_d + D_m$ , где  $D_d$  – диаметр фурье-образа рассеивателя, а  $D_m$  – диаметр области локализации фурье-образа моды. Диаметр той части пучка, которая содержит все пространственные частоты моды, есть

$D = D_d + D_m$ . В пределах диаметра  $D$  диффузного пучка можно записать не более  $N$  голограмм диаметром  $d$ , составляющих матрицу голограмм, где

$$N = \left( \frac{D}{d} \right)^2. \quad (12)$$

В качестве рассеивателя  $P$  целесообразно использовать рассеиватель, интенсивность фурье-образа которого постоянна в пределах области его локализации, что обеспечивает одинаковую интенсивность диффузного пучка в пределах диаметра  $D$ .

### 3. Эксперимент

Диаметр диффузного пучка  $D$  может быть определен экспериментально на установке, схема которой представлена на рис.3. В задней фокальной плоскости линзы  $L1$  устанавливается подвижная диафрагма  $D3$ , диаметр которой равен диаметру голограммы  $d$ . Линза  $L2$  формирует в своей задней фокальной плоскости изображение  $A'$  тест-объекта  $A$ , например штриховой миры, установленной вплотную к рассеивателю  $P$ . Путем перемещения диафрагмы  $D3$  поперек оптической оси находится диаметр  $D$  диффузного пучка, в пределах которого изображение тест-объекта сохраняет свое качество.

Данным методом был найден диаметр диффузного пучка  $D$  при использовании матового стекла в качестве рассеивателя  $P$ . На матовое стекло падал световой пучок диаметром 15 мм с длиной волны излучения 632 нм. Диаметр диафрагмы  $D3$  составлял 1 мм. В качестве линзы  $L1$  использовался объектив с фокусным расстоянием 58 мм. При таких условиях наблюдалось изображение установленной вплотную к матовому стеклу штриховой миры с пространственной частотой 3.2 лин./мм. Изображение миры имело спекл-структуру и контраст 0.86. Диаметр диффузного пучка  $D$ , измеренный при перемещении диафрагмы  $D3$ , составил 8 мм. При данном значении  $D$  и при гексагональной структуре матрицы голограмм (рис.4) можно записать 44 голограммы диаметром 1 мм и, следовательно, измерить 44 моды волнового

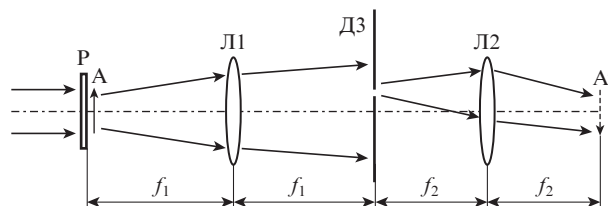


Рис.3. Схема установки для определения области диффузного пучка, в пределах которой записывается матрица голограмм:  $P$  – рассеиватель;  $A$  – тест-объект;  $L1$  – линза;  $D3$  – подвижная диафрагма, установленная в задней фокальной плоскости линзы;  $L2$  – линза, формирующая в задней фокальной плоскости изображение  $A'$  тест-объекта  $A$ .

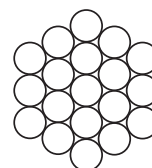


Рис.4. Матрица голограмм гексагональной структуры, содержащая 19 голограмм.

фронта. Согласно (12) в условиях эксперимента максимально возможное число голограмм  $N = 64$ .

#### 4. Заключение

Итак, предложен голографический модовый датчик волнового фронта, позволяющий значительно увеличить число измеряемых мод, доведя их число до нескольких десятков. Увеличение числа  $N$  измеряемых мод волнового фронта достигается путем преобразования измеряемой световой волны в диффузный пучок света и сопровождается уменьшением интенсивности восстановленных голограммами объектных волн, пропорциональным  $1/N$ . Такая зависимость обеспечивает большую интенсивность сигналов датчика по сравнению с альтернативным вариантом – записью всех наложенных голограмм на одном участке регистрирующей среды, когда дифракционная эффективность голограмм уменьшается как  $1/N^2$  [7].

Автор благодарит В.Ю.Венедиктова за ценное обсуждение задачи создания голографического датчика волнового фронта.

1. Platt B.C., Shack R. *J. Refractive Surg.*, **17**, S573 (2001).
2. Roddier F. *Appl. Opt.*, **27**, 1223 (1988).
3. Neil M.A.A., Booth M.J., Wilson T. *J. Opt. Soc. Am. A.*, **17**, 1098 (2000).
4. Andersen G.P., Dussan L., Ghebremichael F., Chen K. *Opt. Eng.*, **48**, 085801 (2009).
5. Dong S., Haist T., Osten W., Ruppe T., Sawodny O. *Appl. Opt.*, **51**, 1318 (2012).
6. Kovalev M.S., Krasin G.K., Malinina P.I., Odinkov S.B., Sagatelyan H.R. *J. Phys. Conf. Ser.*, **737**, 012064 (2016).
7. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. *Оптическая голография* (М.: Мир, 1973).
8. Василенко Г.И., Цибульский Л.М. *Голографические распознающие устройства* (М.: Радио и связь, 1985).
9. Павлов А.В. *Квантовая электроника*, **46**, 759 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 759 (2016)].
10. Павлов А.В. *Квантовая электроника*, **47**, 335 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 335 (2017)].
11. Якимович А.П. *Квантовая электроника*, **2**, 615 (1975) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **5**, 348 (1975)].
12. Anzuola E., Zepp A., Palomo M., Gladysz S., Stein K. *Proc. Imaging and Applied Optics 2016, OSA Tech. Digest* (Heidelberg, Germany, 2016, AOM4C.2).
13. Booth M.J. *Proc. SPIE*, **5162**, 79 (2003).