

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.417 : 681.787

ДАТЧИК ШЭКА — ГАРТМАНА НА ОСНОВЕ РАСТРА  
НИЗКОАПЕРТУРНЫХ ВНЕОСЕВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ\*В. П. Лукин<sup>1</sup>, Н. Н. Ботыгина<sup>2</sup>, О. Н. Емалеев<sup>2</sup>, В. П. Корольков<sup>3</sup>,  
Л. Н. Лавринова<sup>2</sup>, Р. К. Насыров<sup>3</sup>, А. Г. Полещук<sup>3</sup>, В. В. Черкашин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет,  
634021, г. Томск, просп. Ленина, 36  
E-mail: lukin@iao.ru

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН,  
634021, г. Томск, просп. Академический, 1

<sup>3</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

Описывается датчик волнового фронта типа Шэка — Гартмана, созданный на основе растра низкоапертурных внеосевых дифракционных линз. Испытания датчика в тестовом эксперименте показали возможность измерения наклона волнового фронта на субапертурах растра размером  $640 \times 640$  мкм с погрешностью, не превышающей 4,80 угл. с (0,15 пикселя), что соответствует среднеквадратическому отклонению (СКО) ( $\text{СКО} = 0,0170\lambda$ ) в восстановленном волновом фронте. Обсуждаются преимущества используемого в датчике растра и технология его изготовления. Прошедший испытание в тестовом эксперименте датчик предполагается использовать в качестве измерителя параметров атмосферной турбулентности и как элемент адаптивной оптической системы формирования изображения.

*Ключевые слова:* датчик Шэка — Гартмана, растр низкоапертурных внеосевых дифракционных линз, атмосферная турбулентность, адаптивная оптика.

**Введение.** Датчик волнового фронта (ВФ) является одним из ключевых элементов системы адаптивной оптики, который дает информацию о структуре неоднородностей в канале распространения оптических волн, чем обеспечивает эффективную работу исполнительного корректирующего элемента системы коррекции. В настоящее время в адаптивных оптических системах наиболее широко применяются датчики Шэка — Гартмана, особенностью которых является возможность проведения измерений как для когерентного, так и для некогерентного излучения. Датчик такого типа состоит из микролинзового растра и видеокамеры с высоким пространственным и временным разрешением, установленной в плоскости регистрации изображений. По измеренным смещениям центра тяжести (ЦТ) изображений, созданных отдельными элементами растра, вычисляются локальные наклоны ВФ на входных субапертурах растра и восстанавливается ВФ излучения, падающего на микролинзовый растр.

В адаптивных оптических системах, компенсирующих искажения ВФ, вызванные атмосферной турбулентностью, как правило, используются микролинзовые растры. При

\*Работа выполнена при поддержке СО РАН (комплексный интеграционный проект № 80 «Развитие методов высокоточных астроклиматических наблюдений для обеспечения работы адаптивных систем») и Президиума РАН (программа фундаментальных исследований № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», часть 3, проект «Развитие адаптивных систем и измерителей параметров атмосферной турбулентности для улучшения солнечных астрономических наблюдений»).

этом параметры датчика Шэка — Гартмана и его растра рассчитываются на основе общих принципов построения гартмановских датчиков [1] с учетом особенностей воздействия атмосферной турбулентности на характеристики излучения [2–4]. Известные технологии изготовления микролинзовых растров несовершенны, особенно следует отметить низкую повторяемость параметров создаваемых микролинз со сферической формой поверхности [5]. В этой связи возникает естественное желание применить здесь более эффективную с точки зрения возможности обеспечения повторяемости основных параметров дифракционную оптику [6].

В данной работе предлагается новый тип датчика, использующего внеосевые дифракционные оптические элементы.

**Расчет параметров микролинзового растра.** Проведем анализ параметров микролинзового растра, обеспечивающих его согласование, с одной стороны, с реальной оптической системой, а с другой — с размерами матрицы видеокамеры, являющейся чувствительным элементом самой адаптивной системы. Так как входные апертуры реальных оптических систем, формирующих изображения удаленных объектов, значительно превышают размеры светочувствительной матрицы видеокамеры, то для согласования размеров необходимо использовать дополнительные оптические элементы.

Для простоты анализа проведем оценку параметров микролинзового растра датчика Шэка — Гартмана, регистрирующего искажения ВФ плоской волны на горизонтальной атмосферной трассе. Расчет произведем для телескопической системы формирования выходного зрачка. Будем считать, что микролинзовый растр установлен в выходном зрачке оптической системы, а плоскость светочувствительной матрицы совмещена с фокальной плоскостью микролинз. В такой схеме микролинзовый растр должен быть не больше матрицы видеокамеры. При плотной упаковке элементов растра линейное поле в пространстве изображений должно быть ограничено размером отдельного элемента.

Масштабом, определяющим размер субапертур [3, 4], на которых измеряются локальные наклоны ВФ излучения, прошедшего турбулентный слой, является параметр Фрида  $r_0$ . При диаметре входной субапертуры, меньшем параметра Фрида, aberrации ВФ приводят к пренебрежимо малым искажениям дифракционного изображения. В этом случае локальные наклоны ВФ можно определять по смещению ЦТ изображения в системе координат, связанной с опорным ВФ.

Оценку углового поля  $2\omega'$  отдельного элемента микролинзового растра в пространстве изображений необходимо проводить с учетом угловых смещений изображения, вызванных атмосферной турбулентностью.

Дисперсию углов прихода  $\sigma_\alpha^2$  на входной субапертуре можно записать как [2–4]

$$\sigma_\alpha^2 = 0,345\lambda^2 r_0^{-5/3} (D_{\text{суб}})^{-1/3}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $D_{\text{суб}}$  — диаметр входной субапертуры.

Тогда угловое поле  $2\omega$  оптической системы в пространстве предмета определится максимальным углом прихода  $5\sigma_\alpha$ . Из теории оптических систем известно, что  $\text{tg } \omega' = \Gamma \text{tg } \omega$ , где  $\Gamma$  — угловое увеличение телескопической системы. Для локальных углов наклона ВФ, вызванных атмосферной турбулентностью, тангенс угла можно заменить углом. С учетом дифракции на микролинзе диаметром  $2\alpha_{\text{мл}}$  получаем формулу для оценки параметров отдельного элемента растра:

$$\frac{\alpha_{\text{мл}}}{f_{\text{мл}}} = \Gamma \cdot 5\sigma_\alpha + 1,22 \frac{\lambda}{2\alpha_{\text{мл}}} = \Gamma \cdot 1,22 \frac{\lambda}{D_{\text{суб}}} \left[ 5 \cdot 0,48 \left( \frac{D_{\text{суб}}}{r_0} \right)^{5/6} + 1 \right], \quad (2)$$

где  $f_{\text{мл}}$  — фокусное расстояние микролинзы.

Пусть диаметр входной апертуры адаптивной оптической системы  $D_{\text{суб}}$  равен 100 мм (типичные размеры светочувствительных матриц видеокамер составляют 5–10 мм), типичное значение параметра Фрида  $r_0$  при работе оптической системы видимого диапазона пусть будет равно 14 мм ( $LC_n^2 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{1/3}$ , где  $L$  — протяженность атмосферной трассы,  $C_n^2$  — структурная постоянная показателя преломления атмосферы). Тогда при длине волны  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$  и размере субапертуры  $D_{\text{суб}} = 10 \text{ мм}$  получаем  $\alpha_{\text{мл}}/f_{\text{мл}} = 0,004 - 0,002$ ,  $2\alpha_{\text{мл}} = 1,0 - 0,5 \text{ мм}$ , т. е. в экспериментах с лазерным излучением на горизонтальных атмосферных трассах для датчика Шэка — Гартмана необходим микролинзовый растр с низкоапертурными элементами. Чтобы обеспечить регистрацию угловых смещений изображения в диапазоне от долей до 2–3 радиусов дифракционных изображений, необходимы длиннофокусные микролинзовые растры. Упаковка элементов в растре должна быть достаточно плотной. Это убедительно доказано в работах [7, 8], где был проведен численный эксперимент, который показал, что при уменьшении диаметра прозрачной области отдельного элемента растра эффективность адаптивной коррекции заметно уменьшается. Зависимость ее эффективности (согласование фазы) от интенсивности турбулентных искажений показана на рис. 1: кривая 1 — для идеального датчика; 2 — для датчика с 64 субапертурами при отношении радиуса отдельного элемента к радиусу прозрачной области, равном 2; 3 — для датчика с 64 субапертурами при отношении радиуса отдельного элемента к радиусу прозрачной области, равном 7,5; 4 — для датчика без адаптивного управления.

**Реализация низкоапертурного микролинзового растра.** С точки зрения технологии изготовление длиннофокусного микролинзового растра с полным заполнением представляет серьезные трудности. Технология оплавления фоторезиста, позволяющая изготовить наиболее качественные линзовые растры, не может быть использована, так как она, во-первых, ограничена отношением прогиба к диаметру линзы не менее 1 : 20, а во-вторых, не позволяет достичь 100 %-ного заполнения, так как капли расплавленного фоторезиста не должны смыкаться. Прямая лазерная запись по фоторезисту при больших размерах элементов дает как местные неровности профиля, так и девиацию глубины (а значит, и фокуса) от линзы к линзе, достигающую 10 %. В данной работе предложен новый подход к проблеме создания низкоапертурных растров микролинз и датчиков Шэка — Гартмана: замена элементарной линзы растра внеосевым фрагментом дифракционной линзы с таким же фокусом, но значительно большего диаметра.

Расстояние от оптической оси дифракционной линзы до фрагмента выбирается таким,

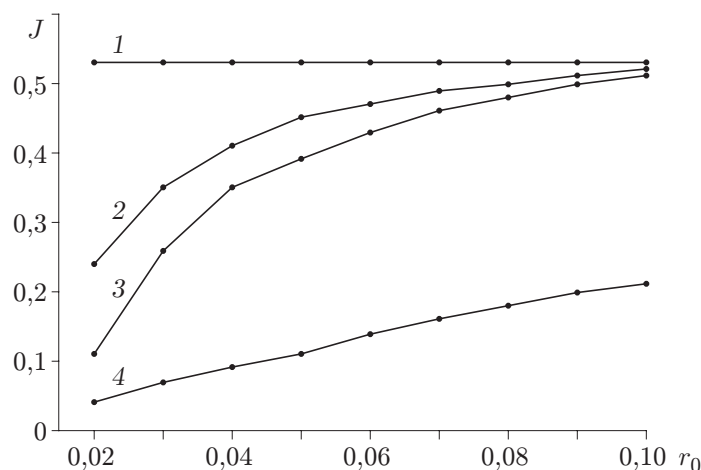


Рис. 1

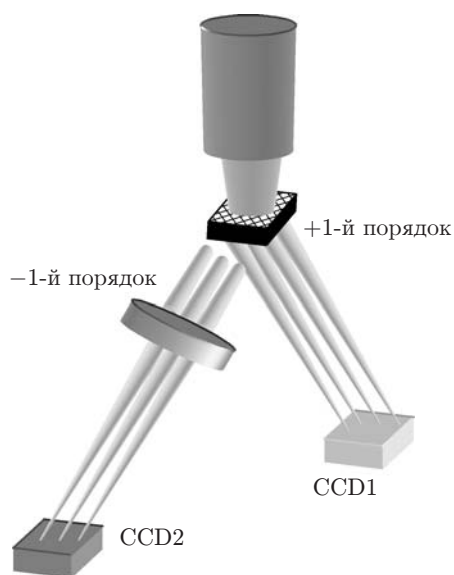


Рис. 2

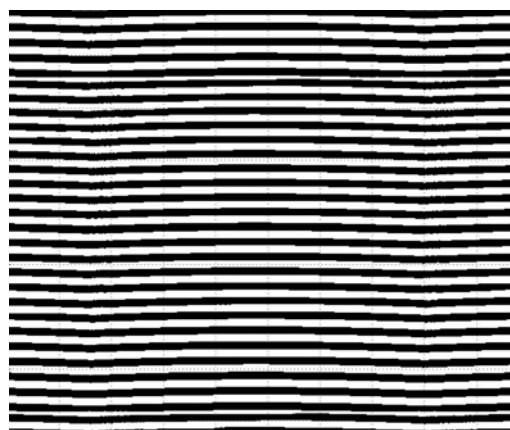


Рис. 3

чтобы дифрагировавший сфокусированный пучок не перекрывался ни с одним пучком 0-го порядка дифракции от других линз. Таким образом, цифровая видеокамера (CCD1) должна быть в таком датчике смещена от оптической оси системы (рис. 2). Растр внеосевых линз может быть реализован и как многоуровневый дифракционный элемент, и как бинарный. В последнем случае дифракционная эффективность (в +1-м порядке) сфокусированного линзами света составляет 40 %, но этот недостаток компенсируется следующими преимуществами: высокой воспроизводимостью фокусов в растре, 100 %-ным заполнением субапертур растра и возможностью создать два канала датчика с разными апертурами. Дополнительная цифровая камера (CCD2) может быть установлена в  $-1$ -м дифракционном порядке. При этом расходящийся  $-1$ -й порядок фокусируется на камеру дополнительной линзой. Масштаб изображения во втором канале определяется ее фокусом.

Точность формирования волнового фронта таким растром во многом зависит от размера пикселя при записи. Проблема в том, что микроструктура внеосевой линзы весьма слабо отличается от линейной решетки. Фрагмент внеосевой линзы, рассчитанной в 5-м порядке дифракции для облегчения визуального восприятия кривизны микроструктуры, показан на рис. 3. Расчет микроструктуры реального растра внеосевых линз был произведен в +1-м порядке дифракции с размером пикселя 0,25 мкм, что соответствует точности формируемого волнового фронта не хуже  $\lambda/4$  (период дифракционных зон во внеосевой линзе в диапазоне 6–7 мкм). Запись растра производилась на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300IAE с применением термохимической технологии. Структура записанной хромовой маски переносилась в кварцевую подложку методом ионного травления. На основе изготовленного растра с размером ячейки микролинзовой матрицы  $640 \times 640$  мкм и числовой апертурой отдельного элемента 0,005 был реализован датчик Шэка — Гартмана.

Распределение интенсивности в плоскости фокусировки +1-го порядка дифракции приведено на рис. 4. Паразитные дифракционные порядки вызваны дифракцией на квадратных субапертурах ячеек растра. Но интенсивность в них очень мала, так как фотография сделана с большой переэкспозицией для выявления структуры паразитной засветки.

**Испытание датчика Шэка — Гартмана с растром внеосевых дифракционных линз.** В качестве эталона искажений в тестовом эксперименте использовался оптический клин, который помещался перед линзовым растром в коллимированном лазерном пучке с длиной волны излучения 0,63 мкм. Схема экспериментальной установки представ-

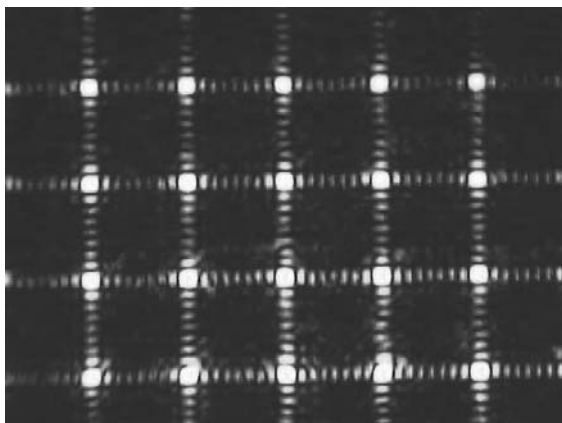


Рис. 4

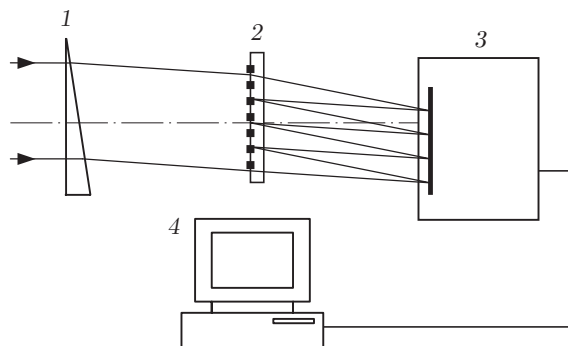


Рис. 5

лена на рис. 5: 1 — оптический клин (угол при вершине  $60 \pm 10''$ , точность поверхности  $\lambda/4$ ); 2 — растр внеосевых дифракционных линз (его параметры  $8 \times 8$  микролинз с числовой апертурой 0,005, размер квадратных субапертур  $640 \times 640$  мкм); 3 — видеокамера DS-41-300K0262 фирмы «Далса» (Канада) (ее параметры  $532 \times 516$  пикселей, 1 пиксель = 10 мкм, 262 кадр./с); 4 — компьютер с платой ввода изображения PC-DIG-L фирмы «Согесо» (Канада). Поворот клина 1 вокруг оптической оси системы приводит к смещению дифракционных изображений в фокальной плоскости микролинз растра. Регистрация изображений при каждом положении оптического клина осуществляется видеокамерой. Плоскость ПЗС-матрицы видеокамеры совпадает с фокальной плоскостью микролинзового растра.

Для определения координат ЦТ дифракционных изображений и вычисления локальных наклонов волнового фронта падающего на линзовый растр излучения применяется специально разработанный пакет программ. При вычислении координат ЦТ для уменьшения влияния шумовой составляющей сигналов освещенности используется алгоритм следящего окна анализа. Суть алгоритма заключается в следующем:

а) на записанной гартманограмме определяются координаты максимума освещенности каждого дифракционного изображения;

б) вокруг точки максимума каждого изображения создается окно анализа, размер которого равен диаметру первого темного кольца дифракционной картины;

в) в рамках окна анализа считаются координаты ЦТ изображения.

Таким образом, происходит обрезание неосвещенных и слабо освещенных элементов ПЗС-матрицы, сигнал с которых содержит большую долю шумовой составляющей.

Положение центра окна для анализа каждого дифракционного изображения определяется в системе координат, связанной с ПЗС-матрицей. Координаты ЦТ таких изображений, рассчитанные в окне анализа, приводятся к той же системе координат.

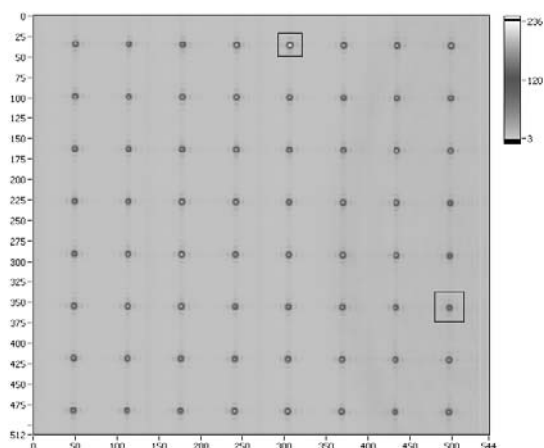


Рис. 6

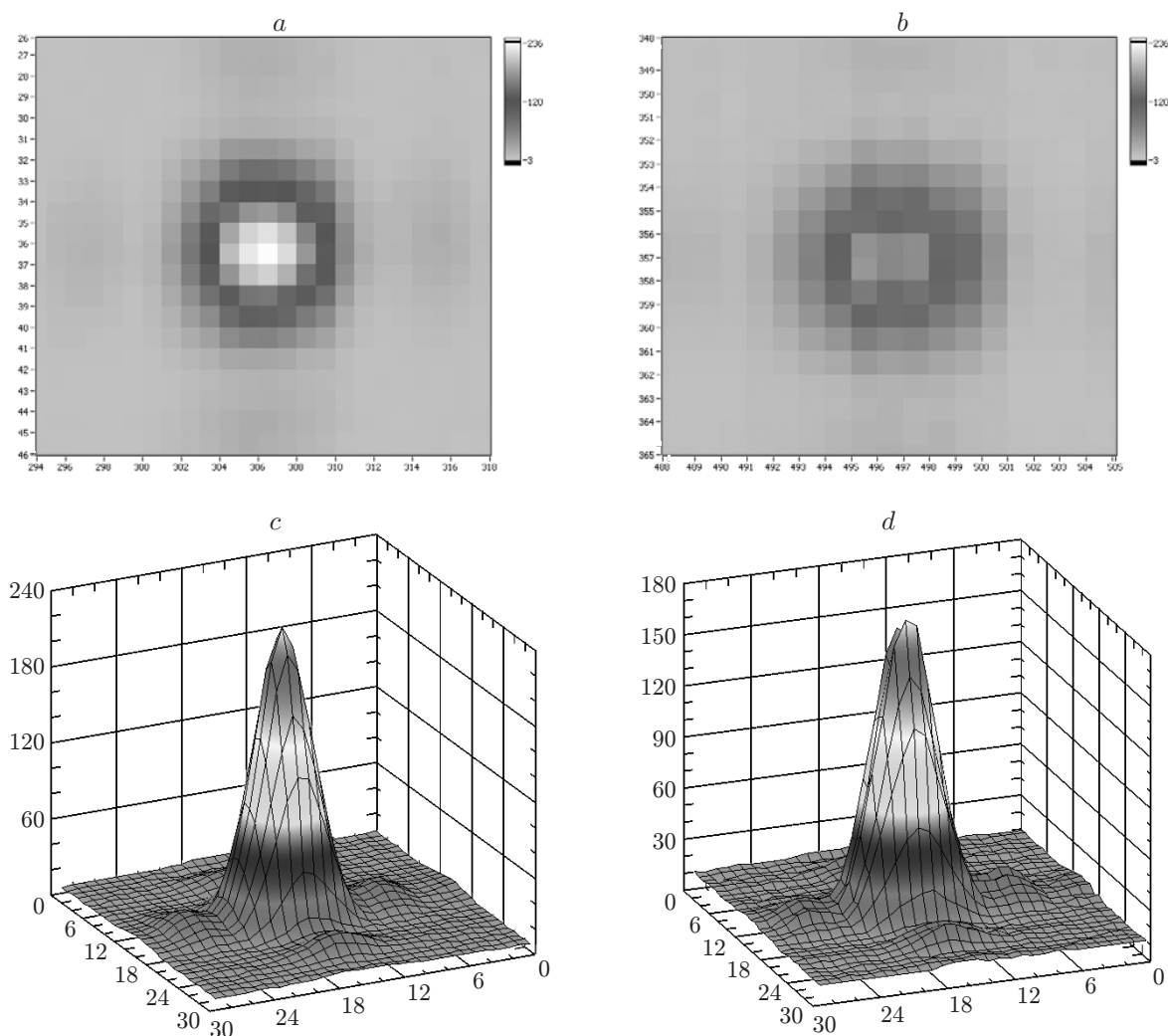


Рис. 7

Вид регистрируемых гартманов представлено на рис. 6. На рис. 7 приведены распределения освещенности в первых (*a*, *c*) и вторых (*b*, *d*) выделенных дифракционных изображениях. На рис. 6 и 7 координаты изображений даны в пикселях матрицы видеокамеры.

Траектории смещения ЦТ первого (*a*) и второго (*b*) выделенных изображений при вращении клина *1* вокруг оптической оси показаны на рис. 8. Координаты ЦТ вычислялись в окне анализа размером  $12 \times 12$  пикселей. На рис. 8 по осям координат отложены смещения ЦТ в пикселях. Угловой масштаб пикселя, определяемый размером элемента ПЗС-матрицы видеокамеры и фокусным расстоянием линзового раstra, равен  $32,6$  угл. с. Точка с координатами  $(0, 0)$  соответствует начальному положению оптического клина. Угол использованного оптического клина равен  $60 \pm 10''$ , следовательно, угол наклона волнового фронта излучения после прохождения клина —  $30 \pm 5''$ . Из рисунка видно, что при малом общем наклоне ВФ, близком к угловому размеру пикселя, система регистрации следит за перемещением ЦТ на доли пикселя.

Траектории смещения ЦТ всех 64 дифракционных изображений, созданных линзовым растром при повороте оптического клина на  $360^\circ$  вокруг оптической оси, совмещены на рис. 9. Несовпадение траекторий связано с погрешностями изготовления оптических

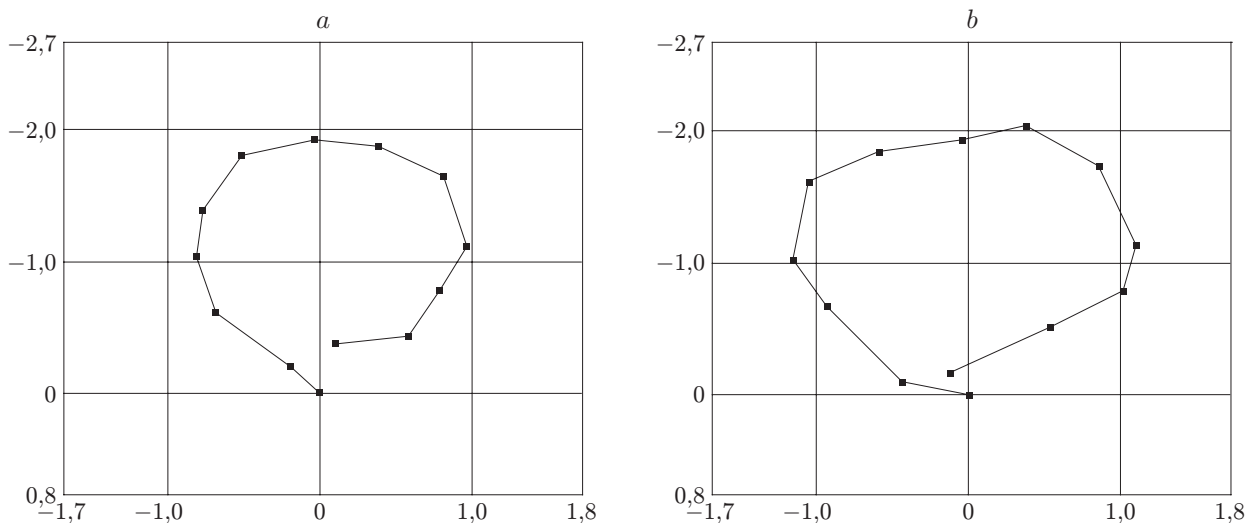


Рис. 8

элементов, абберациями волнового фронта лазерного излучения и шумами системы регистрации.

На рис. 10 приведены средние значения смещений центров тяжести всех дифракционных изображений гартманогаммы при каждом фиксированном положении оптического клина по оси  $X$  ( $a$ ) и по оси  $Y$  ( $b$ ). Каждое последующее положение отличается от предыдущего поворотом оптического клина вокруг оптической оси системы на угол, равный  $30^\circ$ . Вертикальными отрезками на графиках показаны среднеквадратические отклонения смещений. Из графиков следует, что погрешность измерений (среднеквадратическое отклонение) при любом положении клина не превышает 0,15 пикселя.

**Проверка алгоритма восстановления волнового фронта и его программной реализации.** Если ВФ излучения на входной апертуре датчика при начальном (нулевом) положении клина принять за опорный, то его деформации в любом другом положении клина можно описать функцией волновых аббераций  $W(\rho)$  в виде разложения по базисным

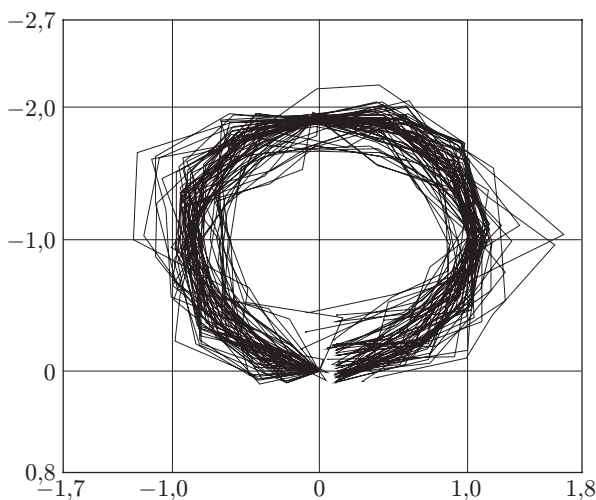


Рис. 9

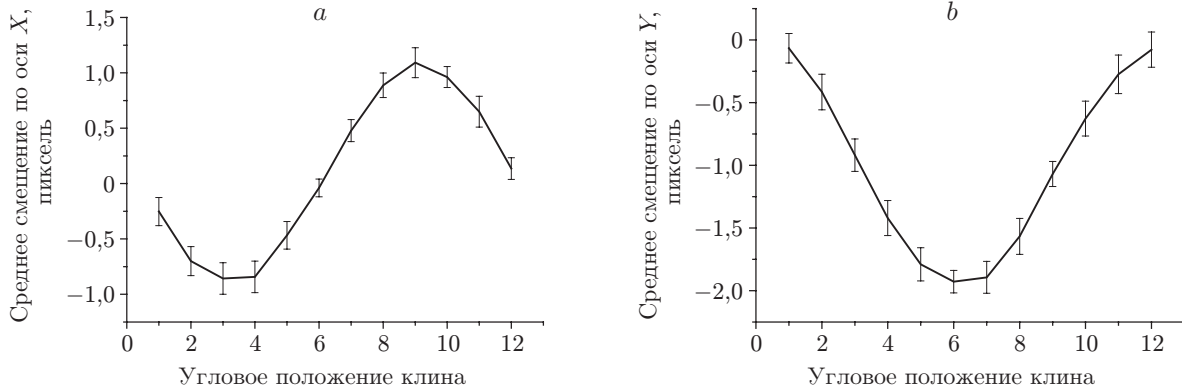


Рис. 10

полиномам Цернике  $Z_i(\rho)$  в круге единичного радиуса:

$$W(\rho) = \sum_{i=1}^N c_i Z_i(\rho), \quad (3)$$

где  $\rho = \{X, Y\}$ ;  $X, Y$  — координаты, нормированные на радиус входной апертуры. Значения производной

$$\frac{\partial W}{\partial \rho} = \sum_{i=1}^N c_i \frac{\partial Z_i}{\partial \rho} \quad (4)$$

в точках, связанных с центрами входных субапертур, пропорциональны измеренным смещениям ЦТ дифракционных изображений. Подставляя в левую часть уравнения (4) полученные в результате измерений значения  $\partial W/\partial \rho$ , можно оценить коэффициенты разложения  $c_i$ . Точность оценки повышается, если количество таких  $\partial W/\partial \rho$  превышает количество этих коэффициентов, а оценка проводится с привлечением метода наименьших квадратов для минимизации по  $c_i$  отклонений измеренных производных и вычисленных в тех же точках по формуле (4).

Изложенный алгоритм восстановления ВФ был программно реализован в датчике Шэка — Гартмана и использовался в тестовом эксперименте. В табл. 1 приведены первые 14 полиномов Цернике.

В эксперименте с идеальными элементами при любом положении клина восстановленный волновой фронт должен иметь только наклоны, т. е. в разложении необходимо присутствие только двух первых полиномов. На рис. 11, *a, b* приведены результаты восстановления ВФ из 64 измерений  $\partial W/\partial X$  (кривая 1) и  $\partial W/\partial Y$  (кривая 2) при разложении по двум полиномам и по 14 первым полиномам Цернике соответственно. Из сравнения рис. 10 и 11, *a* следует, что характер изменения коэффициентов разложения  $c_1$  и  $c_2$  при повороте оптического клина соответствует изменению усредненных смещений ЦТ дифракционных изображений. Абсолютные значения тангенсов углов наклона ВФ, вычисленные по среднему смещению ЦТ изображений и через функцию волновых aberrаций (3), практически совпадают:

$$\frac{\Delta \bar{x}}{f} = \frac{W(X=1, Y=0)}{R} = \frac{2c_1 \lambda}{R}, \quad \frac{\Delta \bar{y}}{f} = \frac{W(X=0, Y=1)}{R} = \frac{2c_2 \lambda}{R},$$

где  $R$  — радиус входной апертуры.



Таблица 1

Номер полинома	Полиномы Цернике $Z_i(X, Y)$	Аберрации
1	$2X$	наклон
2	$2Y$	наклон
3	$2\sqrt{6}XY$	астигматизм
4	$\sqrt{3}(2X^2 + 2Y^2 - 1)$	дефокусировка
5	$\sqrt{6}(X^2 - Y^2)$	астигматизм
6	$2\sqrt{2}(3X^2Y - Y^3)$	трилистник
7	$2\sqrt{2}(3X^2Y + 3Y^3 - 2Y)$	кома
8	$2\sqrt{2}(3X^3 + 3XY^2 - 2X)$	кома
9	$2\sqrt{2}(X^3 - 3XY^2)$	трилистник
10	$4\sqrt{10}(X^3Y - XY^3)$	четырёхлистник
11	$2\sqrt{10}(4X^3Y + 4XY^3 - 3XY)$	астигматизм
12	$\sqrt{5}(6X^4 + 12X^2Y^2 + 6Y^4 - 6X^2 - 6Y^2 + 1)$	сферическая
13	$\sqrt{10}(4X^4 - 4Y^4 - 3X^2 + 3Y^2)$	астигматизм
14	$\sqrt{10}(X^4 - 6X^2Y^2 + Y^4)$	четырёхлистник

В реальном эксперименте волновой фронт излучения, падающего на входную апертуру датчика, отличается от плоского. Кроме того, при восстановлении ВФ неточность формирования волновых фронтов отдельными элементами раstra, а также шумы регистрации изображения и вычисления ЦТ тоже будут восприниматься как деформации волнового фронта. Восстановление более тонкой структуры ВФ позволяет проверить работу созданного датчика при увеличении количества полиномов Цернике. Результаты восстановления ВФ при разложении функции волновой аберрации по 14 полиномам при повороте оптического клина на  $180^\circ$  (СКО = 0,0048 $\lambda$ ) (положение 6 на рис. 10) представлены на рис. 12, *a, b*. В табл. 2 приведены коэффициенты разложения  $c_i$  для этого положения клина.

Разброс смещений дифракционных изображений гартманограммы при измерении ВФ в тестовом эксперименте приводит к отклонениям восстановленного ВФ от плоскостности. Так как при неизменном количестве измерений точность подгонки коэффициентов разложения возрастает с уменьшением количества полиномов, волновой фронт, восстановленный из 128 измерений по двум полиномам, можно принять за эталонный и посчитать отклонения от плоскостности ВФ в зависимости от количества полиномов Цернике ( $N_Z$ ). Результаты расчета показаны на рис. 13. Отклонения вычислялись в точках, взятых на

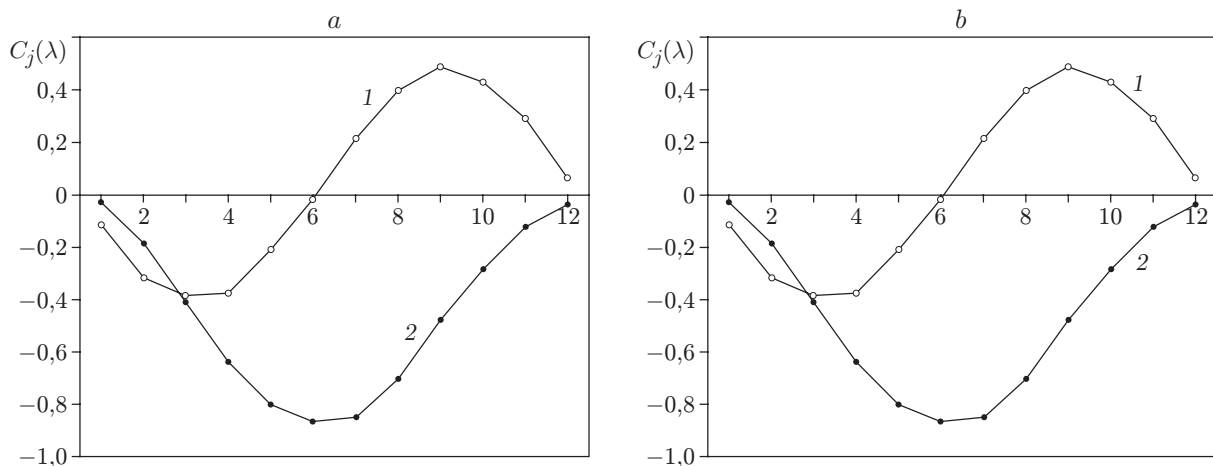


Рис. 11

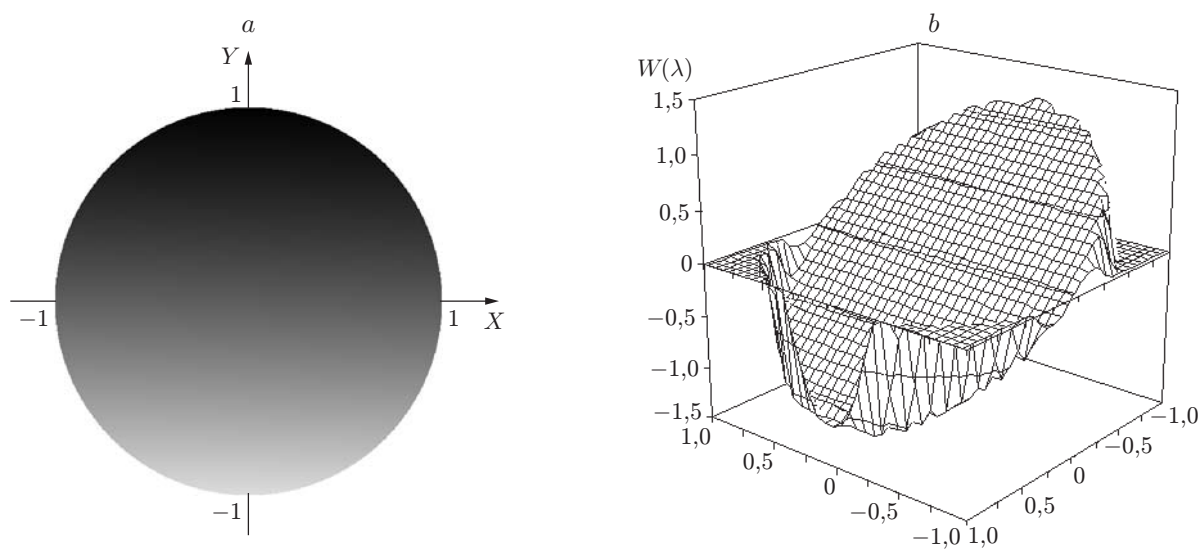


Рис. 12

Таблица 2

Коэффициент разложения	Значение	Коэффициент разложения	Значение
$c_1$	-0,017 404 8	$c_8$	0,002 510 48
$c_2$	-0,865 603	$c_9$	-0,004 977 69
$c_3$	-0,006 644 62	$c_{10}$	0,001 502 18
$c_4$	-0,007 632 43	$c_{11}$	-0,002 522 2
$c_5$	0,006 309 73	$c_{12}$	-0,001 805 7
$c_6$	0,000 521 853	$c_{13}$	0,001 265 8
$c_7$	-0,000 139 564	$c_{14}$	-0,002 275 67

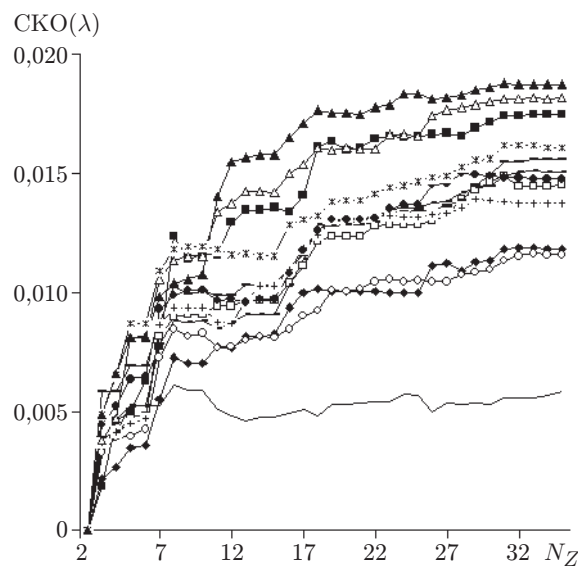


Рис. 13

входной апертуре датчика с шагом  $R/255$  ( $R$  — радиус апертуры). При восстановлении ВФ по 14 полиномам СКО лежат в интервале  $(0,0048 - 0,016)\lambda$ , увеличиваясь с уменьшением угла наклона ВФ от  $62,0''$  до  $8,4''$ . При восстановлении ВФ по 18 полиномам интервал смещается незначительно  $(0,005 - 0,0165)\lambda$  и практически не изменяется при увеличении числа полиномов.

**Заключение.** Построен новый тип датчика волнового фронта Шэка — Гартмана на основе внеосевой дифракционной оптики. В ходе тестового эксперимента была осуществлена проверка элементов и программных средств такого датчика, применяемого для измерения деформаций ВФ лазерного излучения, которое распространяется на горизонтальных атмосферных трассах.

Использование в датчике раstra низкоапертурных внеосевых дифракционных линз с высоким качеством формирования волновых фронтов и высокой степенью повторяемости параметров отдельных элементов позволило регистрировать наклоны ВФ с высоким угловым разрешением ( $\sim 10$  угл. с). Общая ошибка системы измерения (формирование изображения, регистрация гартманогаммы и вычисление углового смещения центров тяжести изображения) не превышает  $4,8$  угл. с ( $0,15$  пикселя в плоскости регистрации), что приводит к среднеквадратическому отклонению от плоскостности восстановленного волнового фронта, не превышающему  $0,0170\lambda$ .

Разработанный пакет программ позволяет в реальном времени измерять смещения центров тяжести изображений и восстанавливать волновой фронт на входной апертуре датчика. Прощедший испытание в тестовом эксперименте датчик Шэка — Гартмана предполагается использовать в качестве измерителя для определения параметров атмосферной турбулентности и как элемент адаптивной оптической системы формирования изображения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Витриченко Э. А.** Методы исследования астрономической оптики. М.: Наука, 1980.
2. **Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С.** Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976.
3. **Лукин В. П.** Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986.
4. **Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В.** Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
5. **Тараненко В. Г., Шинин О. И.** Адаптивная оптика в приборах и устройствах. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005.
6. **Korolkov V. P., Poleschchuk A. G., Nasyrov R. K. et al.** Application of off-axis microlens array in low aperture Shack — Hartmann sensor // Тр. 4 Междунар. форума «Голография ЭКСПО – 2007». М.: ООО «Голография-сервис». С. 150–153.
7. **Kanev F., Lukin V., Makenova N.** Limitations of adaptive control efficiency due to singular points in the wavefront of a laser beam // Proc. SPIE. 2003. **4884**. P. 265–272.
8. **Канев Ф. Ю., Лукин В. П., Макенова Н. А.** Регистрация фазового профиля когерентного излучения и реализация адаптивного управления лазерным пучком при наличии особых точек в волновом фронте // Оптика атмосферы и океана. 2002. **15**, № 11. С. 1018–1026.

*Поступила в редакцию 18 августа 2008 г.*