

В. В. Аполлонов, Г. В. Вдовин, В. В. Кийко, С. В. Муравьев, С. А. Четкин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ДАТЧИКА ГАРТМАНА**

*Описан быстродействующий автоматизированный датчик Гартмана, осуществляющий представление волнового фронта в виде разложения по низшим аберрациям. Датчик обеспечивает регистрацию вектора наклонов волнового фронта размерностью 38 с циклической частотой 625 Гц и разложение контролируемого волнового фронта в базисе 19 полиномов Цернике с частотой восстановления волнового фронта 45 Гц. Исследованы возможности использования датчика для измерения динамических и статистических характеристик световых пучков, искаженных турбулентной атмосферой.*

**Введение**

Измерение формы волнового фронта (ВФ) световых пучков является традиционной задачей прикладной оптики. Для контроля и управления состоянием оптических систем средствами активной и адаптивной оптики, при передаче и приеме информации через турбулентные среды, при оптическом атмосферном мониторинге, в крупногабаритных высокоразрешающих наземных астрономических телескопах такие измерения необходимо осуществлять в реальном времени с высокими точностью и пространственным разрешением. Кроме того, желательно, чтобы прибор для измерения ВФ мог использовать световые пучки с низкой временной когерентностью, обеспечивать высокую скорость восстановления ВФ и представлять измеренный ВФ в виде разложения в ряд по низшим аберрациям (полиномам Цернике). Этим требованиям удовлетворяют датчики Гартмана (ДГ) [1, 2].

Цель настоящей работы состояла в экспериментальной реализации быстродействующего автоматизированного ДГ, осуществляющего представление ВФ в виде разложения по низшим аберрациям. Исследуется ДГ, обеспечивающий разложение контролируемого ВФ на базисе 19 полиномов Цернике с частотой восстановления ВФ 45 Гц.

**Описание датчика**

Датчик ВФ, выполняющий регистрацию параметров и восстановление ВФ, состоит из двух функционально связанных устройств: оптоэлектронного блока и мини-ЭВМ. Оптоэлектронный блок включает в себя растр субапертур, матрицу позиционно-чувствительных фотоприемников и электронный блок, осуществляющий формирование вектора отклика датчика в двоичном 10-разрядном коде. На ЭВМ возложена обработка вектора отклика. Такая конфигурация датчика позволяет реализовать различные режимы работы ДГ — разложение ВФ по заданному набору базисных функций, измерение пространственных или временных статистических характеристик ВФ — путем выбора соответствующего алгоритма обработки вектора отклика.

Структурная схема ДГ приведена на рис. 1. Контролируемый световой пучок с близким к плоскому ВФ освещает матрицу позиционно-чувствительных фотоприемников через растр из 19 круглых субапертур диаметром  $d = 0,8$  мм каждая, расположенных в узлах гексагональной сетки с

шагом 12 мм. Матрица кремниевых квадрантных фотодиодов типа ФД-19КК расположена на расстоянии  $l = 1$  м от растра. Каждый фотодиод измеряет смещение светового пятна  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  в декартовых координатах; ортогональные компоненты наклона ВФ на субапертуре  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  определяются выражениями  $\varphi_x = \Delta_x / l$ ,  $\varphi_y = \Delta_y / l$ . Вектор отклика датчика состоит из 38 координатных сигналов. Для обеспечения дальнопольного распределения освещенности на фотоприемниках диаметр субапертуры  $d$  и расстояние  $l$  выбраны из условия  $l > d^2/\lambda$ . Диаметр контролируемого светового пучка определяется максимальным расстоянием между субапертурами растра и равен 48 мм.

Координатный сигнал положения светового пятна на чувствительной площадке фотоприемника определяется как линейная комбинация фото-токов с площадок фотоприемника (рис. 2). При стационарном однородном распределении энергии в световом пятне абсолютные значения координат его "центра тяжести" определяются выражениями [3]

$$\begin{aligned} X &= K(I_1 + I_2 - I_3 - I_4) / \\ (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) &= U_x / U_\Sigma, \\ Y &= K(I_1 + I_3 - I_2 - I_4) / \\ (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) &= U_y / U_\Sigma, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $I_i$  — фототоки отдельных площадок фотодиодов;  $K$  — координатная чувствительность фотодиодов.

Выходным сигналом фотоприемного блока является вектор из 57 аналоговых сигналов ( $U_x, U_y, U_\Sigma$ ), пропорциональных разностным и суммарным фототокам отдельных фотоприемников.

Аналоговые сигналы с фотоприемного блока поступают в электронный блок, где они нормируются в соответствии с выражениями (1) (при этом

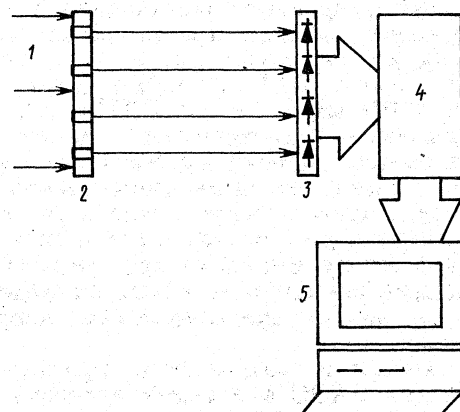


Рис. 1. Структурная схема ДГ: 1 — контролируемый пучок; 2 — растр субапертур; 3 — матрица позиционно-чувствительных фотоприемников; 4 — блок усилителей и управляющей электроники; 5 — мини-ЭВМ

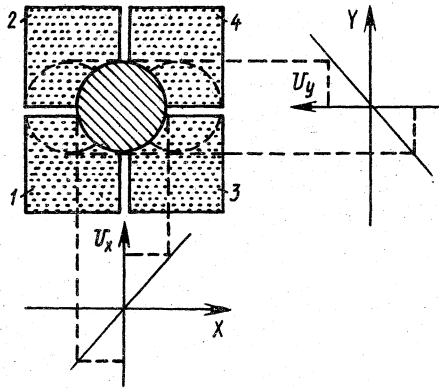


Рис. 2. Схема освещения позиционно-чувствительного фотодиода

57 суммарных и разностных сигналов преобразуются в 38 координатных сигналов), координатные сигналы  $X$  и  $Y$  оцифровываются и передаются в ЭВМ. Полный цикл преобразования 38 координатных сигналов при десяти разрядах выходного кода выполняется за 400 мкс, цикл преобразования и считывания в управляющую ЭВМ ДВК-3М занимает 1,5 мс.

### Исследование технических характеристик датчика

Использование квадрантных фотодиодов для измерения координат световых пятен накладывает ограничения на точность и динамический диапазон измерений [3]. Эти ограничения — нелинейная зависимость отклика фотоприемника от смещения светового пятна и зависимость отклика от светового потока — должны учитываться при выборе условий эксплуатации датчика и в алгоритмах обработки вектора отклика.

Линейность, чувствительность, диапазон измерения координат пятен и допустимый диапазон изменения светового потока исследовались на экспериментальной установке (рис. 3). В качестве источника излучения использовался He-Ne-лазер ЛГ-52-1. Растр субапертур  $b$  освещался через коллиматор, состоящий из микрообъектива 3, микродиафрагмы 4 и двухлинзового объектива 5, скорректированного на сферическую aberrацию. Качество светового пучка контролировалось при помощи автоколлимационной схемы и сдвиговым интерферометром.

На рис. 4,а приведена зависимость оцифрованного координатного сигнала от смещения светового пятна. Нелинейность отклика не превышает 1% в диапазоне смещений  $\pm 100$  мкм и 2% в диапазоне

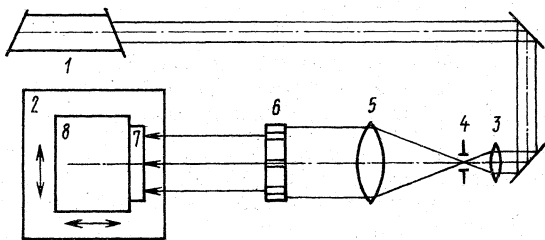


Рис. 3. Схема установки для исследования характеристик ДГ:

1 — He-Ne-лазер; 2 — двухкоординатный стол с цифровым отсчетом; 3 — микрообъектив; 4 — точечная диафрагма; 5 — объектив; 6 — растр субапертур; 7 — матрица фотоприемников; 8 — блок предварительных усилителей

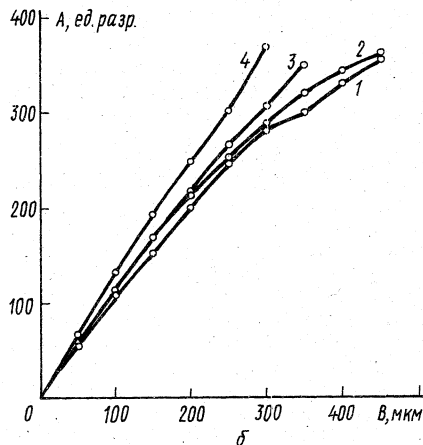
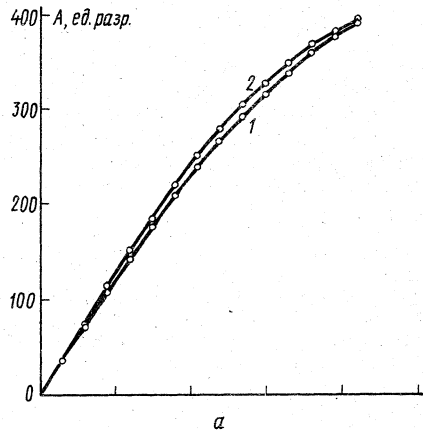


Рис. 4. Зависимость отклика датчика  $A$  от смещения светового пятна  $B$  в первом (1) и в девятнадцатом (2) канале (а) ( $W = 40$  мкВт) и в первом канале для освещающего фотоприемник светового потока,  $W = 25$  (1), 60 (2) и 70 (3) и 80 мкВт (4) (б)

$\pm 160$  мкм, что при расстоянии от растра до маски фотоприемников  $l = 1$  м обеспечивает диапазон измерения локальных наклонов  $\pm 2,6'$  с нелинейностью, не превышающей 2%. Полученные динамический диапазон и нелинейность отклика позволяют использовать датчик для контроля ВФ в большинстве практических применений.

На рис. 4,б приведены зависимости выходного сигнала канала ДГ от смещения пятна при различном освещаемом световом потоке. Зависимость чувствительности датчика от светового потока (мощности  $W$ ) обусловлена нелинейностью нормирующего преобразования. Исследования показали, что для обеспечения чувствительности ДГ  $\sim 1$  ед. разр./мкм световой поток должен находиться в пределах 30–50 мкВт/канал. Если световой поток удовлетворяет этому требованию, то его нестабильность в пределах  $\pm 10\%$  практически не сказывается на координатной чувствительности. При контроле световых пучков с пространственно-неоднородным стационарным распределением интенсивности световые потоки на фотодиодах будут различаться, соответственно различной будет и координатная чувствительность. Реальная чувствительность всех каналов датчика может быть измерена одновременно путем измерения вектора отклика при пробном сдвиге матрицы. В дальнейшем для заданного распределения интенсивности в освещающем пучке различие в чувствительно-

\*Ед. разр. — единица разряда АЦП (единица дискретизации). (Примеч. автора.)

стях каналов может быть скомпенсировано при обработке на ЭВМ путем домножения вектора отклика на соответствующий вектор постоянных поправочных коэффициентов.

Проведенные исследования подтверждают возможность построения быстродействующего датчика ВФ с использованием квадратных фотодиодов в качестве прецизионных позиционно-чувствительных приборов.

### Восстановление ВФ в виде разложения в ряд по полиномам Цернике

Известны два подхода к восстановлению ВФ из вектора отклика ДГ. В первом подходе [4, 5] фаза восстанавливается в узлах дискретной сетки, совпадающих с субапертурами раstra. Эти алгоритмы накладывают жесткие ограничения на расположение субапертур в растре и не позволяют восстанавливать ВФ в виде непрерывной функции. Во втором подходе [6] искомый ВФ представляется в виде разложения в ряд по системе базисных линейно-независимых функций и вычисляются коэффициенты разложения ВФ в этом базисе. Вычисленная функция аберрации при этом непрерывно определена на всей апертуре приемного раstra. Такие алгоритмы допускают вычисление коэффициентов разложения при различных размерах вектора отклика датчика и произвольном расположении субапертур в растре, а также возможность использования в качестве базиса разложения различных наборов линейно-независимых функций.

Нами было реализовано восстановление ВФ в виде разложения по системе традиционно используемых в оптике полиномов Цернике. Однако реализованный алгоритм допускает использование произвольного набора гладких линейно-независимых базисных функций  $\varphi_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), поэтому в дальнейшем изложении вид этих функций не конкретизируется.

Каждой из базисных функций  $\varphi_i$  может быть поставлен в соответствие вектор отклика ДГ  $\vec{\psi}_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), размерность которого  $M$  больше или равна  $N$ :  $M \geq N$ . Если отклики позиционно-чувствительных приемников лежат в диапазоне линейности, справедливо равенство  $C\vec{\psi}_i = L(C\varphi_i) = CL(\varphi_i)$ , где  $L$  — линейный оператор преобразования ДГ формы ВФ в вектор отклика (в случае ДГ это оператор дифференцирования);  $C$  — произвольная константа. При известном наборе векторов откликов ДГ  $\vec{\psi}_i$  на базисные функции разложение вектора отклика ДГ  $\vec{\xi}$  на измеряемый ВФ по векторам  $\vec{\psi}_i$  может быть найдено из выражения

$$\vec{\xi} \approx \sum_{i=1}^N \vec{\psi}_i c_i \quad (2)$$

где  $c_i$  — искомый набор коэффициентов разложения формы ВФ по системе базисных функций.

Вычисление набора  $c_i$  должно проводиться из условия минимальной длины вектора ошибки  $\vec{\xi} - \sum_{i=1}^N \vec{\psi}_i c_i$ . Объем вычислений минимален, если

векторы  $\vec{\psi}_i$  образуют ортогональный базис. В работе [6] при использовании в качестве базисных функций полиномов Цернике предложено использовать взаимную ортогональность частных производных этих полиномов. Однако в случае растров сложной конфигурации (в частности, для использованного нами гексагонального раstra) это свойство для векторов частных производных не выполняется — скалярные произведения  $\vec{\psi}_i \vec{\psi}_j \neq 0$  и непосредственное использование предложенного в [6] алгоритма приводит к значительным ошибкам восстановления. Избежать неортогональности откликов ДГ можно, сформировав в пространстве линейно-независимых векторов отклика  $\vec{\psi}_i = L(\varphi_i)$

ортогональный базис  $\vec{\alpha}_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) и воспользовавшись алгоритмом ортогонализации Грама-Шмидта [7]:

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}_i &= \sum_{k=1}^N a_{ik} \vec{\psi}_k = \sum_{k=1}^N a_{ik} [L(\varphi_k)] = \\ &= L \left[ \sum_{k=1}^N a_{ik} \varphi_k \right], \end{aligned}$$

где  $\vec{\alpha}_i \vec{\alpha}_j \neq 0$ , если  $i = j$ , и  $\vec{\alpha}_i \vec{\alpha}_j = 0$ , если  $i \neq j$ . Таким образом, матрица  $a_{ik}$  преобразует базис полиномов Цернике  $\varphi_i$  в базис  $\alpha_i$ , обеспечивающий взаимную ортонормированность откликов ДГ. Раскладывая отклик ДГ  $\vec{\xi} = L(\xi)$  на пришедший ВФ  $\xi$  по ортонормированному базису  $\vec{\alpha}_i$ , получаем

$$\vec{\xi} \approx \sum_{i=1}^N b_i \vec{\alpha}_i, \text{ где коэффициенты разложения вектора}$$

отклика по ортонормированному базису находятся как скалярные произведения  $b_i = \vec{\alpha}_i \vec{\xi}$ . Воспользовавшись линейностью оператора  $L$ , можно записать

$$\vec{\xi} \approx L \left\{ \sum_{i=1}^N b_i \left[ \sum_{j=1}^N (a_{ij}, \varphi_j) \right] \right\}$$

и результирующие коэффициенты разложения вычислить по формуле

$$c_j = \sum_{i=1}^N a_{ij}, b_i \quad (3)$$

Разложение ВФ разделяется на два этапа: ортогонализацию базисных функций и вычисление коэффициентов  $c_j$ . Ортогонализация проводится один раз для заданных параметров, таких как количество и расположение субапертур, вид базисных функций и количество коэффициентов разложения. В процессе ее выполнения последовательно вычисляются векторы отклика ДГ  $\vec{\psi}_i = L(\varphi_i)$  для каждой из базисных функций набора  $\varphi_i$ . После этого проводится вычисление матрицы  $a_{ij}$  и ортогонального базиса откликов ДГ  $\vec{\alpha}_i$ .

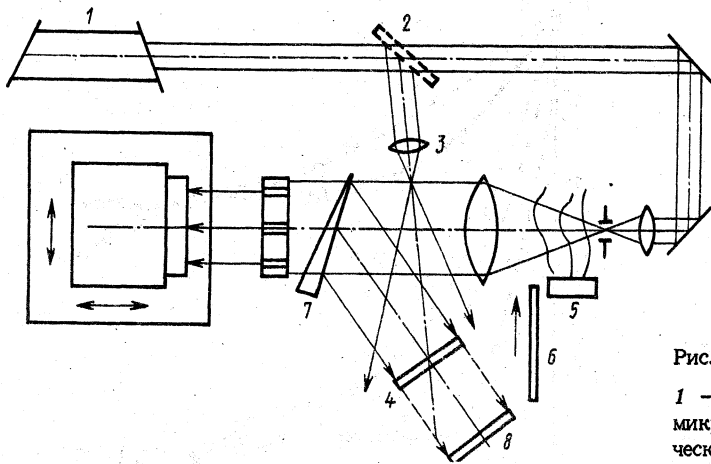


Рис. 5. Схема установки для калибровки ДГ:

1 — He-Ne-лазер; 2 — светоделитель опорного пучка; 3 — микрообъектив, формирующий опорный пучок; 4 — голографическая пластинка; 5 — источник турбулентности (электроплитка); 6 — аббератор; 7 — светоделитель предметного пучка; 8 — фотопластинка для регистрации восстановленной интерферограммы

В процессе восстановления регистрируется отклик ДГ на приходящий ВФ  $\xi = L(\xi)$ , вычисляются весовые коэффициенты  $b_i$  и определяются коэффициенты разложения  $c_j$  (3). Во многих случаях при использовании деформируемых зеркал набор линейно-независимых векторов отклика датчика  $\vec{\psi}_i$ , соответствующих функциям отклика зеркала  $\varphi_i$ , может быть измерен непосредственно самим датчиком. В этом случае исключается влияние ошибок юстировки в тракте зеркало — растр — матрица фотоприемников на точность работы алгоритма.

В алгоритме отсутствует процедура восстановления ВФ в явном виде, поэтому число арифметических операций пропорционально произведению размерности вектора отклика ДГ на размерность вектора коэффициентов разложения. Введение ортогонализации в алгоритм восстановления позволяет легко перестраивать ДГ на использование различных наборов базисных функций и различных геометрий растров субапертур. Введение ортогонализации позволяет использовать неортогональные (но линейно-независимые) наборы базисных функций, какими, например, являются функции отклика деформируемых адаптивных зеркал. Рассмотренный алгоритм был использован нами для разложения контролируемого ВФ по системе 19 полиномов Цернике, время преобразования отклика ДГ размерностью 38 в вектор коэффициентов разложения ВФ по 19 полиномам Цернике при использовании ЭВМ ДВК-3М не превышало 1/40 с.

Измерение ВФ требует предварительного исследования точности восстановления ВФ и калибровки ДГ по эталонной методике. С этой целью была проведена серия экспериментов по одновременной регистрации формы ВФ с помощью ДГ и методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. При проведении первой экспозиции форма ВФ регистрировалась ДГ и одновременно на фотопластинку записывалась голограмма неискаженного ВФ. Перед второй экспозицией в исследуемый пучок вводилась абберация (вносился кусок отмытой фотопластинки) и процесс измерения — запись повторялся. При освещении проявленной голограммы опорным пучком в восстановленном исследуемом пучке наблюдалась

интерферограмма, соответствующая внесенной абберации. Цель эксперимента — сравнение ВФ, восстановленного датчиком, с ВФ, восстановленным из голографической интерферограммы. На рис. 6 приведены изолинии ВФ, полученные разложением абберации по 19 полиномам Цернике при помощи ДГ, и интерферограмма ВФ, полученная методом двухэкспозиционной голографической интерферометрии. Среднеквадратичное отклонение измеренного датчиком ВФ  $\varphi$  от восстановленного с интерферограммы  $\psi$  вычислялось с использованием выражения

$$\sigma^2 = \int_S (\varphi - \psi)^2 dS / \int_S \psi^2 dS; \quad (4)$$

интегрирование проводилось по площади светового пучка диаметром 48 мм. Для низкочастотных аббераций была получена погрешность измерения  $\sigma \leq 5\%$ , что соответствует средней погрешности измерения  $\sigma_\lambda \leq 5$  мкм.

#### Использование датчика для оценок статистических характеристик ВФ

Структура датчика предоставляет широкие возможности для исследования обусловленных турбулентностью статистических характеристик ВФ. Эти исследования актуальны для мониторинга атмосферы, проводимого, например, при выборе мест размещения устройств, осуществляющих передачу и прием оптических пучков на атмосферных трассах.

С этой целью были разработаны алгоритмы, обеспечивающие восстановление ВФ в реальном времени, а также измерение временных и пространственных корреляционных функций наклонов исследуемого ВФ. Для моделирования атмосферной турбулентности в оптическую систему осветителя вводился поток нагретого воздуха, создаваемый электрической плиткой (рис. 5). Пространственный масштаб искажений светового пучка регулировался изменением положения плитки внутри коллиматора.

При оценках временной автокорреляционной функции наклон ВФ в отдельном канале ДГ (или средний наклон по растру субапертур) циклически регистрируется с интервалами  $\tau \ll \tau_{\text{кор}}$  ( $\tau_{\text{кор}}$  — время "замороженности" атмосферной турбулентности) и записывается в оперативную память ЭВМ. Объем ОЗУ ЭВМ ДВК-3М позволяет при

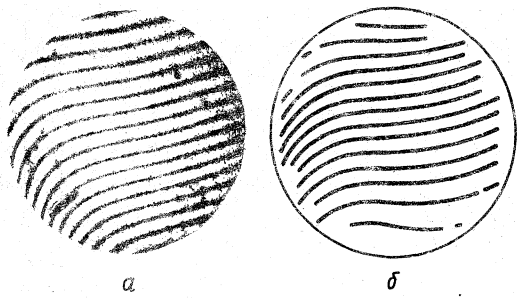


Рис. 6. Голографическая интерферограмма ВФ (а) и соответствующая ей топограмма ВФ, восстановленного ДГ (б)

частоте регистрации 625 Гц обеспечить регистрацию наклонов ВФ во временном интервале  $\tau_{\max} \approx 3$  с. Оценка автокорреляционной функции вычисляется с использованием выражения

$$K(\tau) = F^{-1}\{F\{f(t)\} F^*\{f(t)\}\}, \quad (5)$$

где  $F\{f(t)\}$  — оператор преобразования Фурье;  $f(t)$  — зарегистрированная функция наклонов. На рис. 7 приведены временные автокорреляционные функции для спокойной и турбулентной атмосферы. Среднее время вычисления одной функции автокорреляции (с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье) составляет 1–2 мин.

Для экспериментального определения пространственной корреляционной функции наклонов (в предположении ее стационарности) используется выражение [8]

$$R_{mn} = (\langle \varphi_n \varphi_m \rangle - \langle \varphi_n \rangle \langle \varphi_m \rangle) / [(\langle \varphi_n^2 \rangle - \langle \varphi_n \rangle^2)(\langle \varphi_m^2 \rangle - \langle \varphi_m \rangle^2)]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\varphi_n$  — компонента наклона ВФ на  $n$ -й субапертуре по оси  $X$  или  $Y$ ;  $\varphi_m$  — компонента наклона ВФ на  $m$ -й субапертуре по оси  $X$  или  $Y$ ; угловые скобки означают усреднение по времени. Отсчеты наклонов проводятся через промежутки времени, превышающие интервал временной корреляции.

Выражение (6) описывает статистическую, усредненную по времени связь проекций наклонов ВФ в субапертурах  $m$  и  $n$ . Возможна одновременная регистрация всей матрицы  $R_{nm}$ , имеющей для 19 субапертур размерность  $19 \times 19$ .

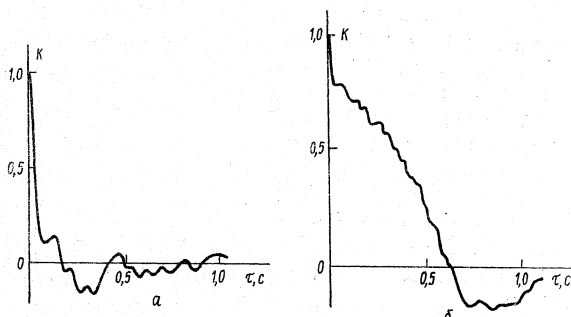


Рис. 7. Временные корреляционные функции наклонов ВФ, зарегистрированные в отсутствие турбулентности в освещающем тракте (а) и при наличии сильной турбулентности (б)

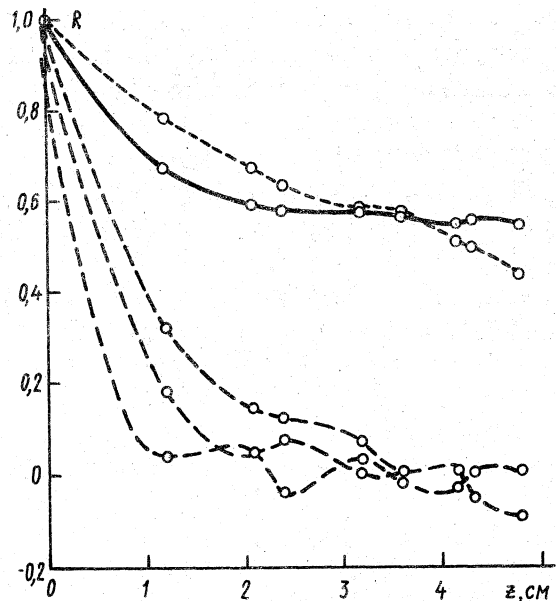


Рис. 8. Пространственные корреляционные функции наклонов ВФ, полученные в спокойной атмосфере (сплошная кривая) и для различных характерных масштабов турбулентности на трассе освещающего потока (пунктир)

Поскольку в каждой субапертуре измеряются две компоненты локального наклона ВФ, более полное описание пространственных статистических характеристик возможно при регистрации четырех автокорреляционных матриц, описывающих статистическую связь компонент наклонов ВФ на оси  $X$  и  $Y$ . При этом первая матрица описывает корреляцию между  $X$ -компонентами наклонов ВФ, вторая — между  $Y$ -компонентами и две оставшиеся матрицы описывают перекрестную связь  $X \rightarrow Y$  и  $Y \rightarrow X$ . Оценка функции автокорреляции проводится на двумерной дискретной сетке, конфигурация которой связана с конфигурацией растра субапертур. В предположении осевой симметрии функции автокорреляции возможно вычисление одномерной функции автокорреляции:

$$R(z) = \overline{R_{nm}(S_{nm} = z)},$$

где черта сверху означает усреднение по всем комбинациям индексов  $n$  и  $m$ , которым соответствует расстояние  $z$  между субапертурами. На рис. 8 приведены одномерные пространственные корреляционные функции  $X \rightarrow X$  для различных масштабов турбулентности. Масштаб турбулентности изменялся путем смещения теплового источника относительно фокальной плоскости коллиматора.

Регулярное гексагональное расположение субапертур в маске датчика ограничивает минимальный и максимальный масштабы функции автокорреляции, регистрируемые датчиком. Минимальный масштаб функции автокорреляции ограничен периодом расположения субапертур в гексагональном растре и равен 12 мм. Максимальный масштаб определяется максимальным расстоянием между субапертурами в растре и равен 48 мм. Использование других (нерегулярных) конфигураций растра с меньшим минимальным расстоянием между субапертурами позволит значительно расширить этот диапазон в сторону малых масштабов, не увеличивая числа субапертур.

Временные интервалы  $\tau$  между отсчетами должны значительно превышать время "замороженно-

сти" турбулентности ( $\tau \gg \tau_{\text{кор}}$ ), в наших измерениях выбиралось  $\tau \approx 3$  с. Это обстоятельство снимает ограничения, связанные с быстродействием датчика и позволяет для каждого зарегистрированного вектора наклонов восстановить ВФ, после чего функция автокорреляции фазы может быть оценена с использованием выражения

$$R(\rho, \alpha, \rho_1, \alpha_1) = \frac{\langle \varphi(\rho, \alpha) \varphi(\rho_1, \alpha_1) \rangle - \langle \varphi(\rho, \alpha) \rangle \langle \varphi(\rho_1, \alpha_1) \rangle}{\left[ \langle \varphi(\rho, \alpha)^2 \rangle - \langle \varphi(\rho, \alpha) \rangle^2 \right]^{1/2} \left[ \langle \varphi(\rho_1, \alpha_1)^2 \rangle - \langle \varphi(\rho_1, \alpha_1) \rangle^2 \right]^{1/2}}$$

где  $\varphi$  — восстановленный ВФ;  $\rho, \alpha, \rho_1, \alpha_1$  — полярные координаты в плоскости входного зрачка системы (растра Гартмана). Аналогичным образом может измеряться и структурная функция фазы.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что развитый методологический подход применим при решении широкого круга задач, требующих оперативной оценки характеристик ВФ. Высокое быстродействие датчика позволяет применять его в адаптивной оптике для оперативного восстановления ВФ и управления деформируемыми зеркалами, при оперативном оптическом контроле для оценок aberrаций ВФ и при исследовании временных и пространственных статистических характеристик световых пучков. Используемый технический подход допускает увеличение числа каналов регистрации до нескольких сотен, что значительно увеличит пространственное разрешение. Применение для обработки вектора отклика более мощного компьютера позволит в несколько раз повысить частоту восстановления ВФ.

Авторы выражают благодарность за помощь, оказанную при выполнении работы В. И. Кислову, В. И. Андриюшину и В. И. Аксинину.

1. М. И. Романова. *Труды ГОИ*, 4, № 35 (1927).
2. Оптический производственный контроль.— М.: Машиностроение, 1985.
3. Yang Yuanhai. *Opt. Laser Technol.*, 18, N 2, 75 (1986).
4. Д. Фрид. В сб.: Адаптивная оптика.— М.: Мир, 1980, с. 332.
5. Р. Хаджин. В сб.: Адаптивная оптика.— М.: Мир, 1980, с. 349.
6. М. Н. Малахов, Б. В. Приленский. *Оптика и спектроскопия*, 58, 455 (1985).
7. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике.— М.: Наука, 1984.
8. С. А. Ахманов и др. Введение в статистическую радиофизику и оптику.— М.: Наука, 1981.

Институт общей физики  
РАН, Москва

Поступила в редакцию  
2 сентября 1991 г.

V. V. Apollonov, G. V. Vdovin,  
V. V. Kiiko, S. V. Murav'ev, S. A. Chetkin.  
Experimental realization of a fast-response Hartmann sensor.

A description is given of a fast-response automated Hartmann sensor which converts the wavefront into an expansion in terms of the lowest aberrations. This sensor can be used to determine the vectors representing the tilts of the wavefront with the dimensionality 38 and a "cyclicity" of 625 Hz, and can be used to expand the monitored wavefront using a basis of 19 Zernike polynomials with the wavefront reconstruction frequency of 45 Hz. A study is reported of the feasibility of using this sensor in determination of the dynamic and statistical characteristics of light beams distorted by a turbulent atmosphere.