

УДК 550.388.2; 554.510.535

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОПРИЁМНЫХ УСТРОЙСТВ В ДАТЧИКАХ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШЭКА — ГАРТМАНА

Л. В. Антошкин, В. В. Лавринов, Л. Н. Лавринова, В. П. Лукин

*Учреждение Российской академии наук
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения РАН,
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
E-mail: lvv@iao.ru*

В плоскости регистрации изображения датчика волнового фронта Шэка — Гартмана в качестве приёмного устройства применяются высокоразрешающие видеокамеры, с помощью которых регистрируются координаты центроидов, несущих исходную информацию для реконструкции волнового фронта. Проведён сравнительный анализ точности определения координат центроидов для видеокамер, построенных на основе ПЗС- и КМОП-технологий. Рассмотрены режимы «мгновенной» выборки и кадрового накопления информации с камеры.

Ключевые слова: координаты центроида, фотоприёмное устройство, распределение интенсивности.

Введение. В конце 60-х и начале 70-х годов прошлого века на смену электровакуумным фотоприёмникам пришли твердотельные устройства формирования изображения: фотоприёмные ПЗС- и КМОП-матрицы, преобразующие свет в электрический сигнал. Несмотря на их практически одновременное изобретение, до середины 1990-х годов КМОП-матрицы не рассматривались как серьёзный конкурент ПЗС-фотосенсоров [1]. Сегодня эти фотосенсоры используются во всех видеосистемах бытового и промышленного назначения, причём применение фотоприёмных КМОП-устройств расширяется интенсивнее, чем более дорогих ПЗС-преобразователей изображения [2].

Анализ распространённых типов матричных фотоприёмников [3–5] показывает, что КМОП-фотосенсоры по качеству изображения (равномерность фона, шумы, динамический диапазон, разрешение) пока уступают ПЗС-преобразователям, но обладают рядом преимуществ перед ними:

- высокая степень интеграции и размещение в одном чипе с матрицей блоков обработки изображений и интерфейса;
- более высокая достижимая частота кадров;
- возможность выборочного чтения;
- отсутствие блуминга при предельной освещённости отдельных элементов матрицы фотоприёмного устройства;
- низкое энергопотребление;
- малая стоимость.

Постоянное улучшение основных характеристик матричных фотоприёмных КМОП-устройств делает их сопоставимыми с ПЗС-фотосенсорами по характеристикам в отдельных сферах применения. Удешевление элементной базы видеокамер, появление всё более мощных средств обработки больших массивов данных с высокой скоростью способствуют эффективному использованию таких видеокамер в адаптивной оптике.

В предлагаемой работе исследуются вопросы применимости фотоприёмных КМОП-устройств в датчиках волнового фронта Шэка — Гартмана в системах различного назначения.

Анализ влияния характеристики распределения интенсивности в пучке на точность определения координат центроидов. В адаптивной системе датчик волнового фронта Шэка — Гартмана, состоящий из линзового растра и высокоразрешающей видеокамеры в плоскости регистрации изображения, делит проходящий на входную апертуру датчика волновой фронт на конечное число субапертур. Для каждой субапертуры наклон волнового фронта оценивается по смещениям энергетических центров тяжести фокальных пятен (центроидов).

Поскольку выходные сигналы ПЗС- и КМОП-преобразователей представляют собой распределения интенсивности в плоскости регистрации изображения, проведены численные эксперименты по исследованию влияния характеристики распределения интенсивности пучка на входной апертуре адаптивной системы на точность определения координат центроидов и диапазон измерения локальных углов в датчике волнового фронта Шэка — Гартмана.

Сценарий численных экспериментов следующий. Световое поле с амплитудой в виде гауссова распределения и плоской фазой делится линзовым растром (с числом субапертур 8×8) на отдельные световые поля, фокусирующиеся в плоскости регистрации. На каждой субапертуре размером 64×64 пикселя угол падения отдельного светового поля оценивается по смещениям центроидов, координаты которых вычисляются по формулам [6]

$$\xi_k = \sum_{i=1}^{n_i} i I_i / \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}; \quad \eta_k = \sum_{j=1}^{n_j} j I_j / \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}; \quad I_i = \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}; \quad I_j = \sum_{i=1}^{n_i} I_{ij}, \quad (1)$$

где I_{ij} — измеренное значение интенсивности сигнала субапертуры с координатами i, j ; $n_i, n_j, k = 1, \dots, 64$; k — номер субапертуры; n — размер субапертуры.

Амплитуда светового поля на входной апертуре адаптивной системы в экспериментах задавалась в виде двумерных нормированных гауссовых распределений:

- 1) константа;
- 2) гауссов пучок как функция вида $f(x, y) = \exp(-0,01(x^2 + y^2))$;
- 3) супергауссов пучок: $f(x, y) = \exp(-0,01(x^2 + y^2)^4)$;
- 4) гипергауссов пучок: $f(x, y) = \exp(-0,01(x^8 + y^8))$.

Смещения координат центроидов, образующих матрицу размера, соответствующего числу линз в ряду растра, имеющего квадратную упаковку, представлены на рис. 1. Элементами данной матрицы являются значения смещений координат центроидов измеряемого волнового фронта относительно идеальных координат, соответствующих узлам расчётной сетки и расположенных по диагонали матрицы. Значения координат центроидов нормированы на размер расчётной сетки.

Принимая за эталон смещения координат, обозначенные кривой 1, следует отметить, что в центральной части представленных амплитудных распределений ближе всего к эталону измерения, полученные датчиком Шэка — Гартмана для гипергауссова пучка, на периферии — для гауссова. Амплитудное распределение супергауссова пучка даёт наибольшее отклонение от эталона и в центральной части, и на периферии. Таким образом, для любых видеокамер ошибка, вносимая в измерения координат центроидов за счёт влияния характеристики распределения интенсивности в световом поле, должна учитываться при расчёте смещений координат центроидов. Однако компенсация данной ошибки приводит также и к равноценному снижению величины максимального измеряемого угла наклона волнового фронта.

Величина мощности светового поля, попадающего в область k -го элемента матрицы фотоприёмного устройства, при вычислении координат центроидов по формулам (1) является нормирующим коэффициентом и незначительно влияет на точность их определения,

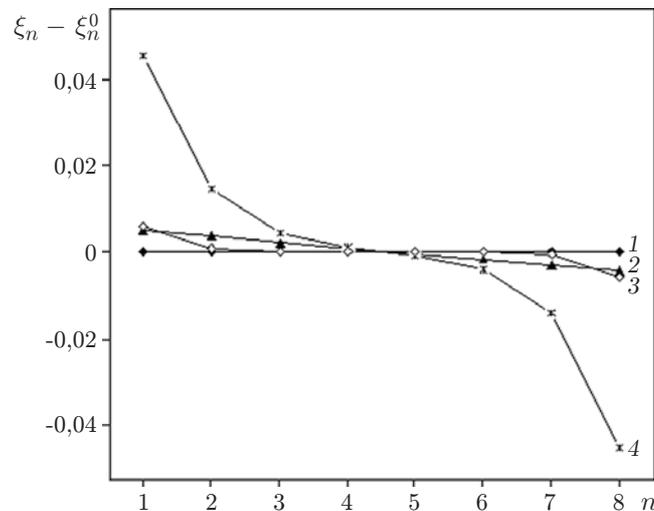


Рис. 1. Смещения координат центроидов для светового поля на входной апертуре датчика, имеющего амплитудное распределение: кривая 1 — константа, 2, 3, 4 — гауссов, гипергауссов, супергауссов пучки

но существенно зависит от положения центроида на фотоприёмной матрице (в центре или на периферии).

Анализ точности определения координат центроидов для видеокамер, построенных на основе ПЗС- и КМОП-фотоприёмников. На базе численных экспериментов проведён сравнительный анализ точности определения координат центроидов для видеокамер, построенных по ПЗС- и КМОП-технологиям, которая зависит от результирующей фотосигнальной характеристики элемента изображения. Её динамический диапазон в твердотельных фотосенсорах представлен следующим образом [7]:

- для высококачественных ПЗС-фотосенсоров более 78 дБ;
- для широкого применения ПЗС-фотосенсоров 66 дБ;
- для широкого применения КМОП-преобразователей изображения 54 дБ.

Однако при худших фотосигнальных характеристиках КМОП-фотосенсоры позволяют достичь более высокой частоты кадров, что весьма важно для адаптивных систем.

Для КМОП-фотосенсоров фотосигнальная характеристика элемента изображения носит нелинейный характер в отличие от линейности аналогичной характеристики ПЗС-фотосенсоров и описывается формулой [7]

$$U_{\text{вых}} = h \ln(i_{\text{ф}}/i_{\text{т}}), \quad (2)$$

где $i_{\text{ф}}$, $i_{\text{т}}$ — фототок и темновой ток элемента изображения.

При моделировании для каждого типа видеокамер разработаны свои методики вычисления координат центроидов, построенные на базе расчётных фотосигнальных характеристик элемента изображения в зависимости от интенсивности светового поля. Для видеокамер, созданных на основе ПЗС-технологии, координаты центроидов находятся по формулам (1), где значения интенсивности I_{ij} соответствуют измеренным. Для видеокамер, разработанных по КМОП-технологии, значения интенсивности I_{ij} вычисляются по данным, приведённым для характеристики фоточувствительности КМОП-матриц [7].

При различных уровнях отсечки выходного сигнала для светового поля с нормированным супергауссовым амплитудным распределением координаты центроидов для фотоприёмных КМОП-устройств значительно отличаются от координат центроидов для ПЗС-фотосенсоров (рис. 2). Понижение ошибки в интервале от 0,15 до 0,30 объясняется большим

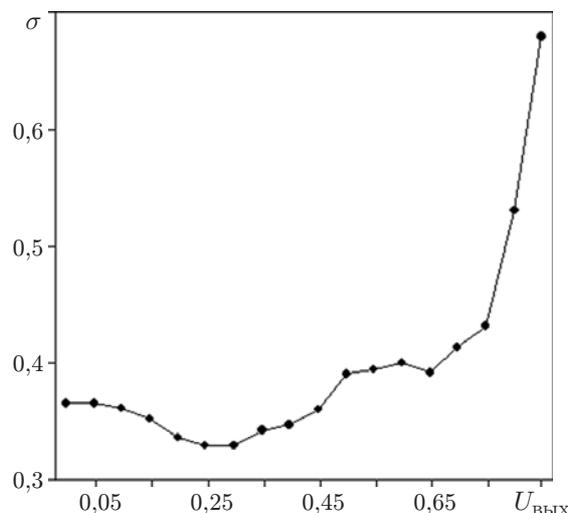


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка σ определения координат фотоприёмных КМОП-устройств относительно ПЗС-фотосенсоров

количеством элементов изображения со значением интенсивности из рассматриваемого интервала как для ПЗС-, так и для КМОП-фотосенсоров.

Анализ преобразования изображения ПЗС- и КМОП-сенсорами в датчике волнового фронта Шэка — Гартмана проводится на основе флуктуаций оптического сигнала, обусловленного действием турбулентности, моделируемой спектром Т. фон Кармана [8]:

$$\Phi_n(\varkappa) = 0,489r_0^{-5/3}(\varkappa_0^2 + \varkappa^2)^{-11/6} \exp(-\varkappa^2/\varkappa_m^2), \quad (3)$$

где $\varkappa_0 = 2\pi/L_0$, $\varkappa_m = 5,92/l_0$ (L_0 , l_0 — внешний и внутренний масштабы неоднородностей). Интенсивность фазовых флуктуаций характеризуется радиусом Фрида r_0 . В экспериментах $L_0 = 10$ м, $l_0 = 1$ мм, $r_0 = 5$ см.

В основе численного эксперимента лежит решение параболического уравнения квазиоптики, описывающего распространение через турбулентную атмосферу светового поля с комплексной амплитудой $E = \mathbf{E}(\boldsymbol{\rho}, z, t)$ [8]:

$$2i\kappa(\partial E/\partial z) = \Delta_{\perp} E + 2\kappa^2 \tilde{n}(x, y)E, \quad (4)$$

где $\tilde{n}(x, y)$ — случайное поле флуктуаций показателя преломления, связанное с турбулентной атмосферой (3); $\kappa = 2\pi/\lambda$ — волновое число ($\lambda = 0,63$ мкм — длина волны); $\boldsymbol{\rho} = |\boldsymbol{\rho}|$, $\boldsymbol{\rho} = (x, y)$ — координаты в поперечном сечении светового поля.

Гауссов пучок проходит через турбулентный экран (3), размещённый на входной апертуре датчика, затем растром из линз с фокальным расстоянием $f \approx 2$ м делится на субапертуры, в каждой из которых вычисляются координаты центроидов (1).

Ошибка в определении координат центроидов датчиком волнового фронта ограничивает сферу применения КМОП-фотосенсоров. При контроле оптических деталей влияние турбулентной атмосферы практически отсутствует и фокальные пятна имеют идеальную радиальную форму. ПЗС- и КМОП-фотосенсоры различаются распределениями интенсивности фокального пятна. На рис. 3 представлены профили распределений интенсивности I_k одного и того же фокального пятна при фиксированной координате η_k , соответствующей центру субапертуры, и меняющейся координате ξ_k . Распределения получены на основе фотоприёмных КМОП- и ПЗС-устройств. Значения интенсивности фокального пятна

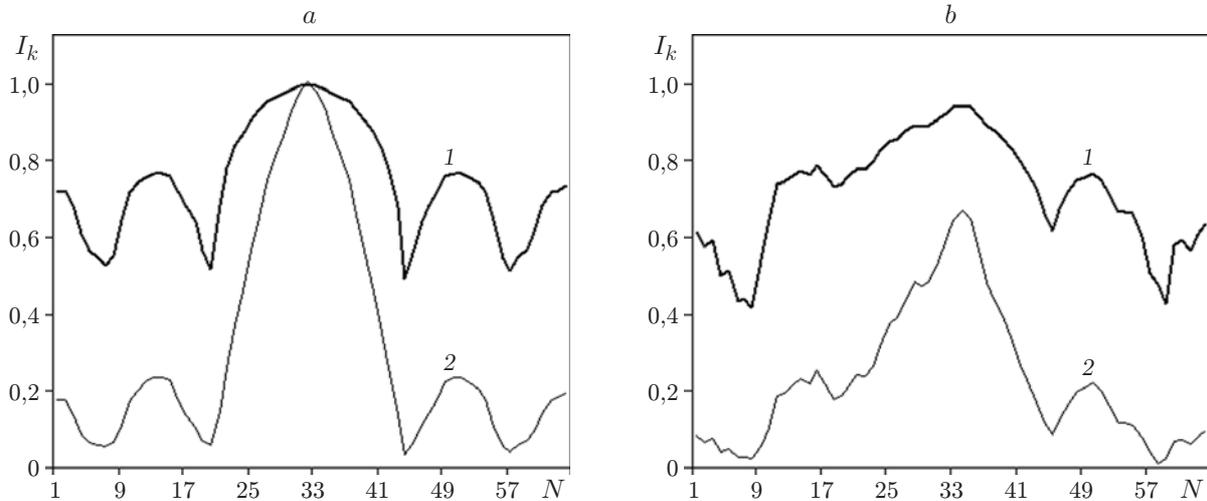


Рис. 3. Профили распределений интенсивности фокального пятна, полученные на основе КМОП- и ПЗС-фотосенсоров (кривые 1 и 2 соответственно): *a* — при контроле оптических деталей, *b* — при коррекции турбулентности

нормированы на максимальную интенсивность. Отличие выражается разной величиной мощности светового поля, попадающего в область k -го элемента матриц анализируемых фотоприёмных устройств. Для датчика волнового фронта, результаты измерений которого представляют координаты центроидов, важным является то, что координаты энергетического центра тяжести k -го фокального пятна различаются для разных преобразователей. Для волнового фронта, искажённого турбулентностью, максимальное значение интенсивности фокального пятна значительно меньше единицы, так как его центр тяжести смещён относительно центра субапертуры, и близко к единице, если центр тяжести пятна совпадает с центром субапертуры, например, при контроле оптических деталей. Координаты центра тяжести k -го фокального пятна, как видно из таблицы, различаются для разных преобразователей при наличии в волновом фронте турбулентных искажений. Различия исчезают при усреднении координат k -го центроида по выборке, полученной смещением турбулентного экрана (3) в поперечном направлении в плоскости линзового раstra.

Иллюстрация различий фотоприёмных устройств, построенных по ПЗС- и КМОП-технологиям, выполнена на основе численных экспериментов, результаты которых представлены на рис. 4 в виде профилей волновых фронтов.

Координаты k -го центроида для одной реализации и для среднего 32 реализаций

| Эксперимент | ПЗС | КМОП | ПЗС | КМОП |
|---|---|--|---|--|
| | Контроль оптических деталей | | Коррекция турбулентности | |
| Одиночная реализация, $V_x = 0$ м/с | $\xi_k = 0,504641$ $\eta_k = 0,504545$ | $\xi_k = 0,50729$ $\eta_k = 0,506773$ | $\xi_k = 0,461773$ $\eta_k = 0,524305$ | $\xi_k = 0,494908$ $\eta_k = 0,51443$ |
| Среднее по 32 реализациям, $V_x = 1$ м/с | $\xi_k = 0,504641$ $\eta_k = 0,504545$ | $\xi_k = 0,50729$ $\eta_k = 0,506773$ | $\xi_k = 0,50508$ $\eta_k = 0,514237$ | $\xi_k = 0,507388$ $\eta_k = 0,5101$ |

Примечание. Значения координат центроидов нормированы на размер расчётной сетки; V_x — поперечная составляющая скорости ветра.

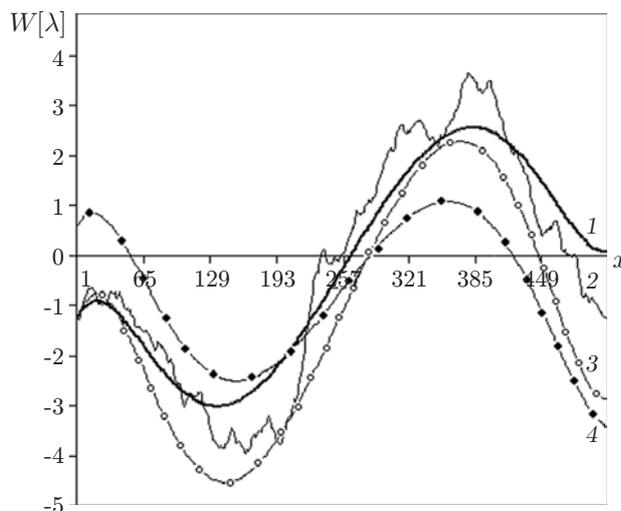


Рис. 4. Профили волновых фронтов: на входной апертуре датчика (кривая 2) и реконструированные датчиком с ПЗС-фотосенсором (1), с КМОП-фотосенсором (4) и КМОП-фотосенсором, отрезающим выходные сигналы ниже уровня 0,02 (см. рис. 2) (3)

Точность реконструкции волнового фронта датчиком с КМОП-фотосенсором в 2 раза превышает точность реконструкции датчиком с ПЗС-фотосенсором. Ошибка реконструкции волнового фронта датчиком с КМОП-фотосенсором с отсечкой выходного сигнала пикселя ниже уровня 0,02 превышает ошибку реконструкции датчиком с ПЗС-фотосенсором лишь в 1,4 раза и почти совпадает, если уровень отсечки выходного сигнала элемента изображения составляет 0,3 от максимальной интенсивности.

Анализ влияния выдержки камеры на точность определения координат центроидов. Для работы со слабоосвещёнными астрономическими объектами требуется увеличение времени накопления света (выдержки). Выдержка видеокамеры влияет на точность работы адаптивной оптической системы. Чтобы оценить погрешность влияния выдержки камеры на точность реконструкции волнового фронта датчиком Шэка — Гарт-

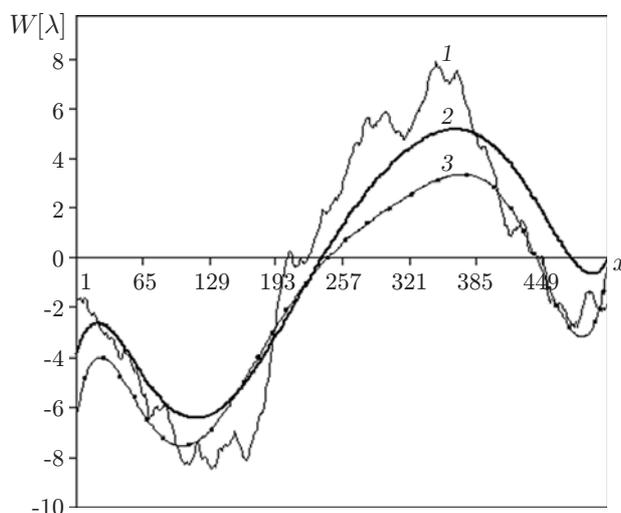


Рис. 5. Профили волновых фронтов: на входной апертуре датчика (кривая 1), реконструированные в режимах покадрового накопления координат центроидов (2) и мгновенной выборки (3)

мана, рассмотрены режимы мгновенной выборки и покадрового накопления, т. е. фактического интегрирования за время кадра высокочастотных пульсаций координат центроидов, вызванных атмосферной турбулентностью (3).

Профили волновых фронтов (рис. 5), полученные в режимах мгновенной выборки координат центроидов и покадрового накопления, отличаются друг от друга и от профиля волнового фронта на входной апертуре датчика. В центральной части, где волновой фронт характеризуется наибольшим углом наклона, профили практически совпадают для обоих режимов выборки информации, т. е. общий наклон профиля волнового фронта один и тот же для обоих режимов. На периферии отличие обусловлено наличием аберраций высокого порядка. Усреднение координат центроидов или в конечном итоге углов наклона ведёт к вычислению более высокого значения профиля волнового фронта (кривая 2). Среднеквадратическое отклонение реконструированного волнового фронта по данным, полученным в режиме мгновенной выборки, относительно измеряемого волнового фронта выше, чем среднеквадратическое отклонение для реконструированного волнового фронта по данным, определённым в режиме покадрового накопления координат центроидов.

Заключение. В датчиках волнового фронта Шэка — Гартмана фотоприёмные КМОП-устройства широкого применения могут с точностью, близкой к точности ПЗС-фотоприёмников, обеспечить измерения координат центроидов при отсутствии турбулентных искажений [9, 10], т. е. их использование ограничивается статическими системами, например, для измерения параметров оптических изделий с временным усреднением в специальных помещениях без павильонных эффектов, а также для коррекции в стационарных условиях параметров оптических лазерных пучков.

В адаптивных оптических системах, корректирующих атмосферную турбулентность, использование фотоприёмных КМОП-устройств широкого применения приводит к снижению качества коррекции вследствие их нелинейности.

Максимально возможная выдержка камеры при заданной частоте повышает точность определения координат центроидов на основе фотоприёмных КМОП-устройств. Погрешность, возникающая за счёт усреднения измерения в режиме покадрового накопления, может быть компенсирована с помощью опережающей адаптивной коррекции [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бирюков Е. В.** Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП // Компоненты и технологии. 2007. № 10. С. 24–27.
2. **Шурыгина В.** КМОП- и ПЗС-датчики изображения. Впереди светлое будущее // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 3. С. 32–39.
3. **Ли И. И., Попов М. В.** Многоходовый процессор с адаптивными устройствами предпроцессорной обработки сигналов для многоэлементных датчиков // Автометрия. 1997. № 6. С. 20–25.
4. **Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А. и др.** Многоэлементные гибридные ИК ФПУ на основе приборов с зарядовой инжекцией. Ч. 1. Принципы считывания сигналов // Автометрия. 2007. 43, № 4. С. 25–35.
5. **Ли И. И.** Устройство считывания для ИК ФПУ с режимом временной задержки и накопления // Там же. С. 56–62.
6. **Антошкин Л. В., Лавринов В. В., Лавринова Л. Н., Лукин В. П.** Измерение поперечного ветрового переноса атмосферной турбулентности на основе датчика Шэка — Гартмана // Горный информационно-аналитический журн. 2009. 17, № 12. С. 129–133.

7. **Gamal A. El.** High Dynamic Range Image Sensors // Tutorial at ISSCC. 2002.
URL: http://isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_pub/isscc02_tutorial.pdf (дата обращения: 8.06.2011).
8. **Лукин В. П., Фортес Б. В.** Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
9. **Курышев Г. Л., Мжельский И. В., Настовьяк А. Е., Половинкин В. Г.** Калибровка фотоприёмного устройства в составе ИК-микроскопа // Автометрия. 2011. **47**, № 5. С. 103–108.
10. **Максимов В. Г., Тартаковский В. А., Полещук А. Г. и др.** Метод повышения точности восстановления волнового фронта по набору интерферограмм // Автометрия. 2011. **47**, № 6. С. 82–91.
11. **Антошкин Л. В., Лавринов В. В., Лавринова Л. Н. и др.** Особенности опережающей коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка — Гартмана // Оптика атмосферы и океана. 2010. **23**, № 11. С. 1042–1047.

Поступила в редакцию 8 июня 2011 г.
