

## ОБРАБОТКА И ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

УДК 522.617

П. А. БАКУТ, Н. Д. БЕЛКИН, А. Д. РЯХИН,  
 К. Н. СВИРИДОВ, Н. Д. УСТИНОВ  
 (Москва)

### АНАЛИЗ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ СЛУЧАЙНЫХ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В настоящее время существуют два подхода к реализации адаптивных оптических систем. Первый подход основан на детектировании атмосферных фазовых искажений светового излучения и их последующей коррекции, второй — на формировании функции резкости изображения и ее максимизации за время меньше интервала временной корреляции атмосферных флуктуаций [1]. Недостаток второго подхода заключается в нечувствительности функции резкости к случайным сдвигам изображения, которые, в свою очередь, затрудняют ее формирование. В связи с этим представляет интерес двухконтурная адаптивная система с компенсацией случайных наклонов волнового фронта и последующим формированием функции резкости. Адаптивная система с максимизацией функции резкости была рассмотрена в [1]. В настоящей работе анализируется адаптивная система с компенсацией случайных наклонов волнового фронта.

Одним из возможных путей оценки случайного наклона является определение случайного сдвига центра тяжести изображения объекта, обусловленного сдвигом центра тяжести изображения любой его точки. В этом случае для случайного вектора наклона  $\mathbf{a}$  волнового фронта оказывается справедливым следующее выражение:

$$\mathbf{a} = \int d\mathbf{v} W(\mathbf{v}) A^2(\mathbf{v}) \text{grad } \varphi(\mathbf{v}) / \int d\mathbf{v} W(\mathbf{v}) A^2(\mathbf{v}), \quad (1)$$

где  $W(\mathbf{v})$  — апертурная функция,  $A(\mathbf{v})$  — случайное значение амплитуды принимаемого светового излучения, а  $\varphi(\mathbf{v})$  — его случайное фазовое искажение.

Как видно из (1), основной причиной случайных наклонов волнового фронта являются фазовые флуктуации  $\varphi(\mathbf{v})$ . Если учесть, что при астрономических наблюдениях влияние амплитудных атмосферных флуктуаций пренебрежимо мало по сравнению с влиянием фазовых [2], то можно считать, что  $A(\mathbf{v}) = \text{const}$  и

$$\mathbf{a} = S^{-1} \int d\mathbf{v} W(\mathbf{v}) \text{grad } \varphi(\mathbf{v}), \quad (2)$$

$S$  — площадь апертуры. Используя известное соотношение из [3], получаем окончательное выражение для вектора  $\mathbf{a}$  в виде

$$\mathbf{a} = S^{-1} \oint_{\Gamma} \varphi(\mathbf{v}) d\boldsymbol{\eta}, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  — граница области апертуры, а  $\boldsymbol{\eta}$  — внешняя нормаль к ней.

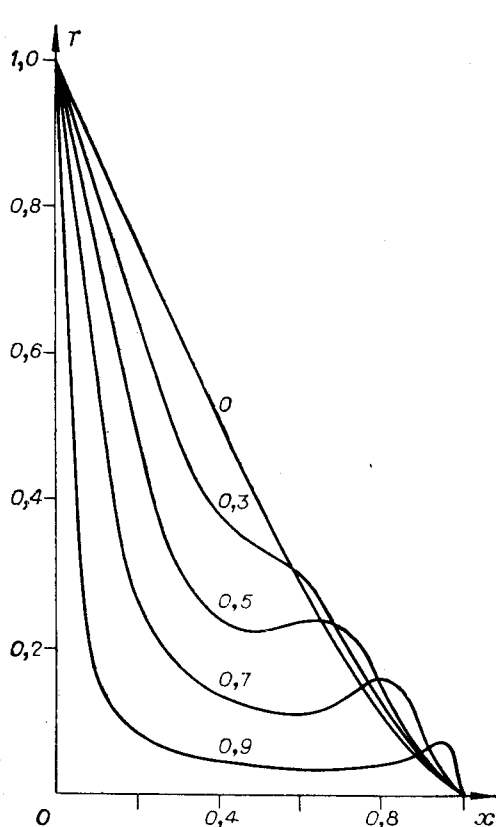


Рис. 1.

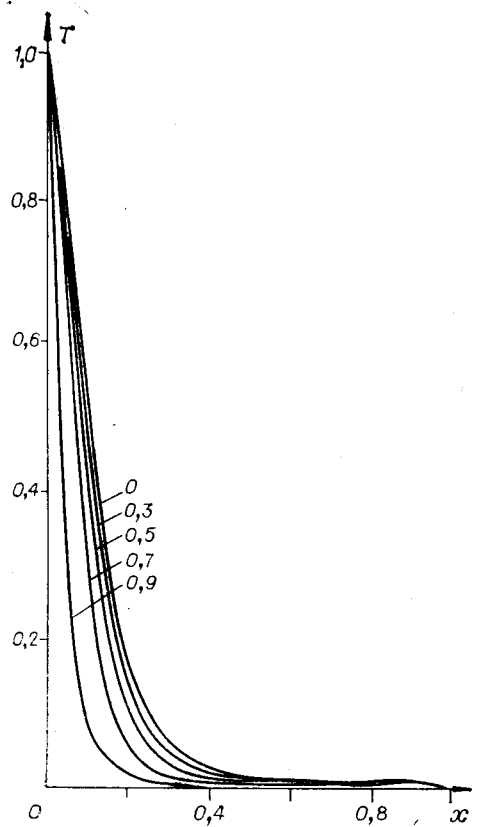


Рис. 2.

Таким образом, адаптивно компенсируемый наклон  $\alpha$  линейно зависит от фазовых флуктуаций  $\varphi(v)$  и его статистическое распределение, подобно распределению  $\varphi(v)$ , является гауссовым. При этом предположении средняя оптическая передаточная функция (ОПФ)  $T(f)$  системы «атмосфера — телескоп» с адаптивной компенсацией случайных наклонов определяется выражением [4]

$$T(f) = T_0(f) \exp \left\{ - (1/2) [D(\lambda L f) - \langle (a \lambda L f)^2 \rangle] \right\}. \quad (4)$$

Здесь  $\lambda$  — средняя длина волны принимаемого светового излучения,  $L$  — фокусное расстояние телескопа,  $T_0(f)$  — ОПФ телескопа, а  $D(x) = \langle [\varphi(v) - \varphi(v+x)]^2 \rangle$  — фазовая структурная функция, которая имеет вид [2, 4]

$$D(x) = 6,88 (|x|/r_0)^{5/3}, \quad (5)$$

$r_0$  — пространственный радиус корреляции атмосферных искажений волнового фронта светового излучения.

Далее рассмотрим практически важный случай — телескоп с кольцевой приемной апертурой, у которой внешний диаметр равен  $D$ , а внутренний —  $\varepsilon D$ . Заметим, что весь последующий анализ можно без труда провести для случая апертуры произвольной формы. Несложно получить, что

$$\langle (a \lambda L f)^2 \rangle = \frac{6,88}{r_0^{5/3}} \frac{(\lambda L |f|)^2}{D^{1/3}} S(\varepsilon), \quad (6)$$

где

$$S(\varepsilon) = \frac{50}{9(1-\varepsilon^2)} \int_0^1 T_0(t) t^{2/3} dt. \quad (7)$$

$\varepsilon$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$S(\varepsilon)$	1,000	0,998	0,995	0,989	0,983	0,976	0,969	0,962	0,957	0,952

Заметим, что при выводе выражения (4) для ОПФ в [4] сделано дополнительное предположение о статистической независимости  $[\varphi(\mathbf{v}) - a\mathbf{v}]$  от  $\mathbf{a}$ . На самом деле это предположение является приближенным, но ошибка оказывается достаточно малой, так что в первом приближении ее можно учесть путем изменения  $S(\varepsilon)$  так, чтобы  $S(0) = 1$ . Значения соответствующим образом отнормированной функции  $S(\varepsilon)$  приведены в таблице.

Средняя ОПФ  $T(f)$  системы «атмосфера — телескоп» без компенсации наклонов определяется выражением [4]

$$T(f) = T_0(f) \exp \{-(1/2)D(\lambda Lf)\}. \quad (8)$$

Из сравнения (4) и (8) видно, что путем адаптивной компенсации случайных наклонов достигается значительное уменьшение влияния атмосферы, особенно заметное в области высоких пространственных частот. Изложенное выше иллюстрируется рис. 1—3, на которых представлены ОПФ телескопа, системы «атмосфера — телескоп» с адаптивной компенсацией и без нее для  $\varepsilon = 0,0; 0,3; 0,5; 0,7$  и  $0,9$  при  $D/r_0 = 5[|x| = \lambda Lf/D]$ .

Качество оптической системы традиционно оценивается ее разрешающей способностью. Существует довольно много способов ее определения. Следуя [4], примем в качестве меры разрешающей способности системы «атмосфера — телескоп» величину

$$R = \int df T(f). \quad (9)$$

По сути своей она определяет корреляционное качество системы [5] и является мерой непосредственного сходства между наблюдаемым объектом и формируемым изображением. Для идеального телескопа без каких-либо искажений разрешающая способность равна  $S/(\lambda L)^2$ , т. е. обратно пропорциональна величине пространственного элемента разрешения системы. С учетом (4) и (8) для оптической системы без компенсации наклонов и системы с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта имеем соответственно величины  $R_{\text{БК}}$  и  $R_{\text{АК}}$ , определяемые выражениями

$$R_{\text{БК}} = 2\pi \left(\frac{D}{\lambda L}\right)^2 \int_0^1 dt t T_0(t) \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} t^{5/3} \right\}, \quad (10)$$

$$R_{\text{АК}} = 2\pi \left(\frac{D}{\lambda L}\right)^2 \int_0^1 dt t T_0(t) \exp \left\{ -3,44 \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} t^{5/3} [1 - S(\varepsilon) t^{1/3}] \right\}. \quad (11)$$

Нетрудно убедиться, что для бесконечно большой апертуры существует предел разрешения  $R_\infty$ , определяемый соотношением

$$R_\infty = \lim_{D/r_0 \rightarrow \infty} R_{\text{БК}} = \lim_{D/r_0 \rightarrow \infty} R_{\text{АК}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r_0}{\lambda L}\right)^2. \quad (12)$$

Отсюда видно, что в случае бесконечно большой апертуры влияние атмосферы устанавливает один и тот же предел разрешения как для си-

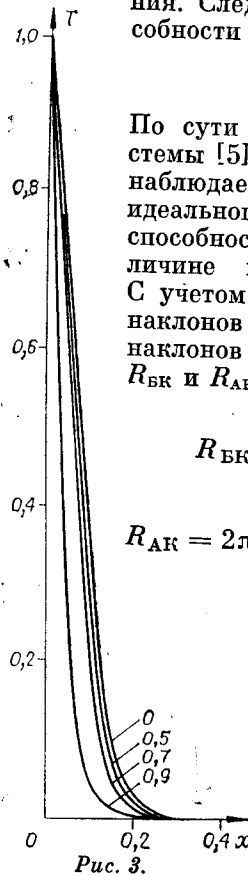


Рис. 3.

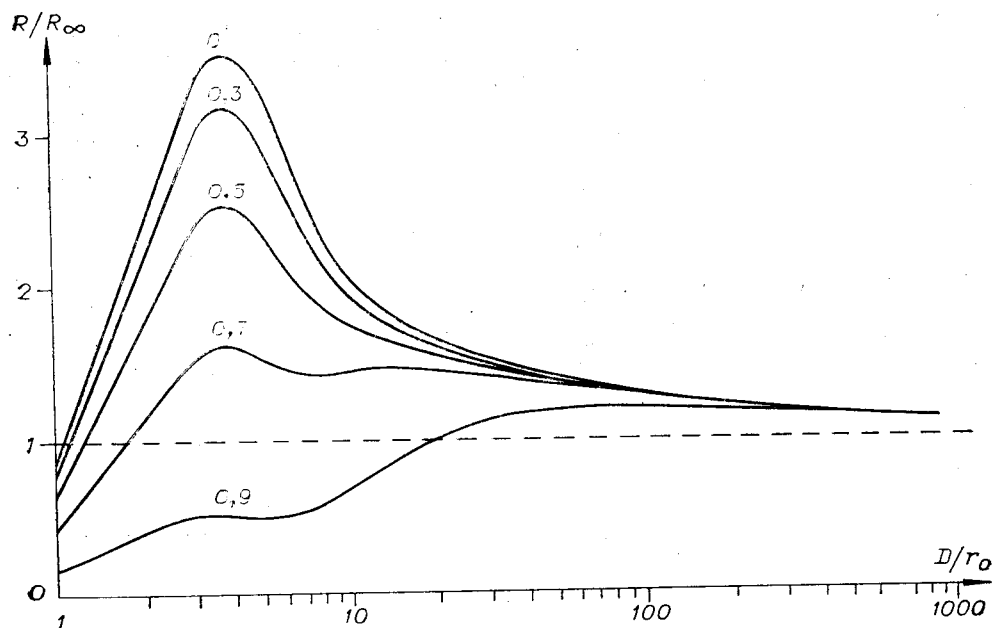


Рис. 4.

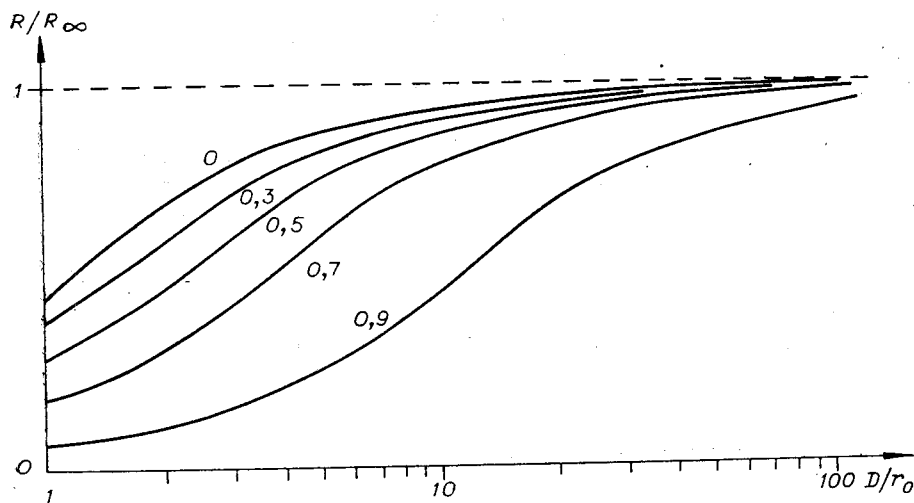


Рис. 5.

стем без компенсации наклонов, так и для систем с их адаптивной компенсацией. Но приближение к этому пределу в указанных системах происходит существенно различным образом, о чем свидетельствуют рис. 4 и 5, на которых представлена разрешающая способность системы «атмосфера — телескоп» с адаптивной компенсацией и без нее. В системах без компенсации наклонов происходит простое монотонное стремление  $R/R_\infty$  к 1, а в системах с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта имеются максимумы разрешения, т. е. существует некоторое оптимальное значение  $D/r_0$ , равное 3,5 для реальных значений величины  $\epsilon$ , при котором достигается увеличение разрешения в 4 раза по сравнению с первыми. Для круглой апертуры этот результат впервые был получен в [4]. Интересно отметить, что для кольцевых апертур с большими значениями  $\epsilon$  появляется второй максимум разрешения, который может существенно превышать первый, достигаемый при  $D/r_0 = 3,5$ . Характерное значение  $r_0$  для видимого диапазона ( $\lambda = 0,5$  мкм)

равно 10 см, а для инфракрасного диапазона ( $\lambda = 10,6$  мкм) оно увеличивается до 4 м, т. е. приблизительно пропорционально  $\lambda^{6/5}$ . Из полученного соотношения  $D_{\text{опт}} = 3,5 r_0$  следует, что в системах с адаптивной компенсацией случайных наклонов волнового фронта для реализации максимального выигрыша в разрешении (в 4 раза) при увеличении рабочей длины волны  $\lambda$  светового излучения необходимо увеличивать диаметр приемной апертуры телескопа  $D$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бакут П. А., Троицкий И. Н., Харитонова О. Н. Адаптивные методы улучшения качества оптических изображений.— Автметрия, 1979, т. 4, с. 41—48.
2. Young A. T. Seeing: its cause and cure.— Astrophys. J., 1974, vol. 189, p. 587—604.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.— М.: Наука, 1973, с. 175.
4. Fried D. L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures.— J. Opt. Soc. Am., 1966, vol. 56, p. 1372—1379.
5. Linfoot E. H. Transmission factors and optical design.— J. Opt. Soc. Am., 1956, vol. 46, p. 740—752.

Поступила в редакцию 26 августа 1982 г.;  
окончательный вариант — 17 января 1983 г.

УДК 621.382.537.22

В. Л. ГРИЩЕНКО, И. А. МАТВЕЕВА  
(Саратов)

### КОНТРАСТНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИНДУКЦИОННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

В оптоэлектрических системах оптическое возбуждение полупроводникового слоя создает рельеф неравновесной проводимости, с помощью которого в электрическом поле формируется пространственное распределение заряда  $\sigma$  или потенциала  $\psi$ . Затем осуществляется индукционное преобразование  $\sigma$  или  $\psi$  в электрический временной сигнал. Таким образом, оптоэлектрический преобразователь следует рассматривать как пространственно-распределенную систему с последовательным преобразованием сигналов одной физической природы в сигналы другой физической природы. Потери пространственной информации на каждом этапе преобразования определяются контрастно-частотными характеристиками (КЧХ) отдельных блоков [1].

На основе предложенных структурной схемы (рис. 1) и математических моделей отдельных блоков исследуются контрастно-частотные характеристики оптоэлектрической системы с индукционным преобразованием. Анализ структурной схемы проводится при следующих предположениях: обратные связи между распределенными блоками отсутствуют; операторы преобразований  $L^1, L^4, L^5$  — линейные интегральные операторы. Частотные функции блоков 2 и 3 предполагаются известными.

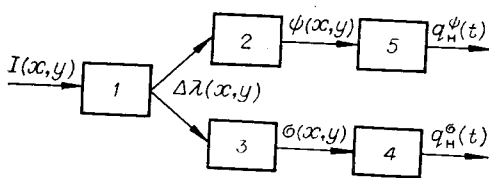


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектрического преобразователя. Блоки преобразования:

1 — оптического изображения  $I(x, y)$  в неравновесную проводимость  $\Delta\lambda(x, y)$  полупроводникового слоя; 2 —  $\Delta\lambda$  в распределенные потенциалы  $\psi(x, y)$ ; 3 —  $\Delta\lambda$  в распределение плотности поверхностного заряда  $\sigma(x, y)$ ; 4 —  $\sigma$  в электрический сигнал  $q_n^\sigma(t)$ ; 5 —  $\psi$  в электрический сигнал  $q_n^\psi(t)$ .