

УДК 621 373 826

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

*М. А. Воронцов, А. В. Корябин, В. И. Шмальгаузен*

Получены оценки эффективности систем адаптивной оптики на основе интерференционного критерия, что позволяет с единых позиций проанализировать работу как приемных, так и передающих систем. Показано, что через интерференционный критерий выражается число Штреля, отношение сигнал/шум в системах оптической связи с амплитудной и фазово-частотной модуляцией, качество работы адаптивных интерферометров. Расчеты проводились для систем с модальным корректором волнового фронта. Обсуждаются вопросы оптимизации корректора

1. Эффективность работы адаптивных систем в турбулентной атмосфере исследовалась в целом ряде работ [1-4]. Однако в подавляющем большинстве из них обсуждаются приемные адаптивные оптические системы. Качество работы этих систем традиционно оценивалось по значению числа Штреля [5].

В настоящей работе для оценки эффективности систем адаптивной оптики используется интерференционный критерий [6]. Это позволяет с единых позиций проанализировать работу как приемных, так и передающих оптических систем, в том числе систем фокусировки с опорным источником (маяком). Показано, что через интерференционный критерий выражается число Штреля, отношение сигнал/шум в системах оптической связи с амплитудной и фазово-частотной модуляцией, качество работы адаптивных интерферометров. Расчеты проводились для систем с модальным корректором волнового фронта. При этом предполагалось, что с помощью корректора возможно точное воспроизведение первых  $M$  полиномов Цернике, описывающих простейшие aberrации волнового фронта [5]. Для первых 10 полиномов Цернике рассчитано распределение дисперсии нескомпенсированной фазы по круговой апертуре адаптивной системы. Полученные результаты могут быть также использованы для расчета сегментированных корректоров и систем, сочетающих как модальную, так и зональную коррекцию волнового фронта в условиях атмосферной турбулентности. Обсуждаются вопросы оптимизации корректора.

2. Интерференционный критерий в задачах адаптивной оптики. Рассмотрим адаптивную систему фокусировки излучения (рис. 1). Пусть волна с комплексной амплитудой электрического поля  $E$  распространяется в турбулентной атмосфере вдоль оси  $z$  от приемно-передающей апертуры, расположенной в плоскости  $z=0$  к объекту ( $z=z_0$ ). После отражения от объекта рассеянное поле с комплексной амплитудой  $\Psi$  регистрируется фотодатчиком в плоскости приемной апертуры. В плоскости  $z=0$  поле излученной волны можно представить в следующем виде:

$$E(\mathbf{r}, z=0) = E_0(\mathbf{r}) e^{i\mu(\mathbf{r})}, \quad (1)$$

где  $r = (x, y)$ ,  $E_0(r)$  — амплитуда излученной источником волны,  $u(r)$  — фазовый профиль после прохождения через корректор волнового фронта. Для волн  $E$  и  $\Psi$ , распространяющихся в противоположных направлениях, существует соотношение, которое сохраняется в любой плоскости  $0 \leq z \leq z_0$  [6, 7]:

$$\int E\Psi|_z d^2r = \text{const.} \quad (2)$$

Значение интеграла (2) в плоскости  $z=0$  называется интерференционным критерием:

$$J_{\text{и}} = \int E_0(r) e^{iu} \Psi(r, z=0) d^2r. \quad (3)$$

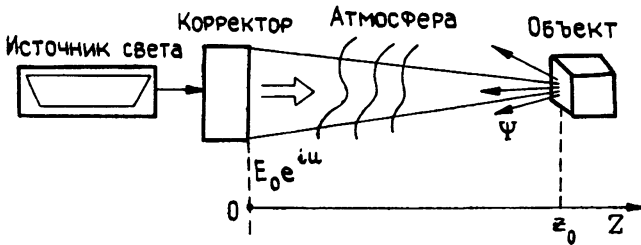


Рис. 1.

Согласно (2) интерференционный критерий  $J_{\text{и}}$  позволяет связать значения полей  $E_0$  и  $\Psi$  в плоскости приемно-передающей апертуры с распределением поля  $E$  на объекте:

$$J_{\text{и}} = \int E\Psi|_{z=z_0} d^2r = \int \kappa(r) E^2(r, z_0) d^2r. \quad (4)$$

Здесь  $\kappa(r)$  — коэффициент рассеяния поверхности объекта. Для точечного объекта  $\kappa(r) = \delta(r)$ , следовательно,

$$J_{\text{и}} = I(0, z_0) \exp[2i\varphi(0)], \quad (5)$$

где  $\varphi(0)$  — фаза поля  $E$  в плоскости объекта. Через  $I(0, z_0)$  обозначено значение интенсивности на объекте при распространении поля в турбулентной атмосфере. Соответствующее значение пиковой интенсивности при оптимальной фокусировке излучения в оптической однородной среде обозначим через  $I_0(0, z_0)$ . Постоянный фазовый сдвиг  $\varphi(0)$  в (5) зависит от выбора среднего уровня фазы излученной волны. По этой причине его всегда можно положить равным нулю:  $\varphi(0) = 0$ . Отношение  $I/I_0$  равно числу Штреля  $S$ . Из (5) следует, что  $S$  может быть выражено через значение интерференционного критерия  $J_{\text{и}}$ :

$$S = J_{\text{и}}/J_0. \quad (6)$$

Величина  $J_0$  соответствует оптимальному значению  $J_{\text{и}}$ , достигаемому при полной компенсации аберраций. В соответствии с (5)  $J_0$  равняется дифракционно ограниченному значению пиковой интенсивности на объекте. Если объект не является точечным, критерий  $J_{\text{и}}$  непосредственно не связан с числом Штреля, но по-прежнему отражает физические требования локализации поля на объекте [6].

В ряде случаев задача фокусировки ставится несколько иначе. На конце трассы ( $z=z_0$ ) расположен опорный источник (маяк). Комплексная амплитуда поля маяка  $\Psi_1(r, z_0)$  в плоскости  $z_0$  считается заданной (например, гауссово распределение интенсивности). На основе анализа поля маяка в плоскости приемной апертуры  $\Psi_1(r, 0)$  требуется сформировать фазу  $u(r)$  излученной волны  $E(r, 0)$  таким обра-

зом, чтобы наилучшим образом сконцентрировать излучение в пределах апертуры маяка [8]. В такой постановке задачи значение интерференционного критерия равно взвешенному по апертуре маяка значению поля  $E(r, z_0)$ .

В приемных адаптивных системах (рис. 2) эффективность коррекции оценивается числом Штреля, которое в этом случае равно отношению интенсивности  $I$  принимаемого поля в фокусе адаптивного телескопа к значению интенсивности  $I_0$  при полной компенсации aberrаций:

$$S = I/I_0.$$

Обозначим через  $\Psi(r, 0)$  комплексную амплитуду поля в плоскости приемной апертуры. После прохождения через корректор комплексная амплитуда поля в пределах апертуры  $A$  равна  $\hat{\Psi} = \Psi e^{i\mu}$ .

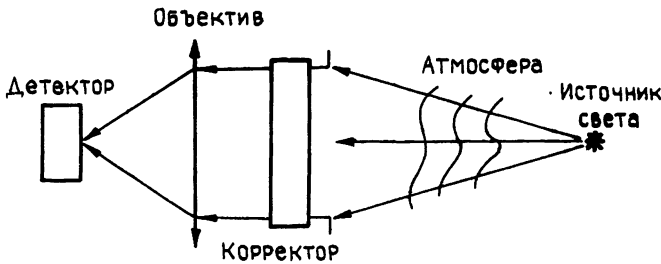


Рис. 2.

Рассмотрим критерий (3), выбрав в качестве опорного поля  $E_0$  волну с плоским фазовым фронтом и единичной амплитудой в пределах апертуры телескопа. Для этого случая получим

$$J_n = \int \Psi e^{i\mu} a(r) d^2r = \int \hat{\Psi}(r) a(r) d^2r, \quad (7)$$

где

$$a(r) = \begin{cases} 1 & \text{при } r \in A \\ 0 & \text{при } r \notin A \end{cases}.$$

Интеграл (7) является частным случаем интерференционного критерия и оказывается полезным при оценке эффективности приемных оптических систем. Действительно, поле  $\mathcal{E}(k)$  в фокальной плоскости телескопа с точностью до фазового множителя совпадает с фурье-преобразованием поля  $\hat{\Psi}$  в плоскости входной апертуры. Значение  $\mathcal{E}(0)$  легко выразить через величину  $J$ :

$$\mathcal{E}(0) = \frac{1}{b(0)} \int \hat{\Psi}(r) a(r) d^2r = J,$$

где  $b(k)$  — преобразование Фурье функции  $a(r)$ .

Интенсивность в фокусе будет  $I = JJ^*/|b(0)|^2$ . Число Штреля  $S$  можно теперь выразить через  $J$  следующим образом:

$$S = JJ^*/J_0J_0^*,$$

где  $J_0$  — значение интеграла  $J$  в отсутствие aberrаций.

В адаптивных системах оптической связи с гетеродинированием и в интерферометрах корректор волнового фронта может быть расположен как в опорном, так и в объектном плече (рис. 3а, б) [9]. Естест-

венно оценивать качество адаптации по величине отношения  $SNR$  — сигнал/шум в системе. При расположении корректора в объектном плече ток детектора пропорционален интегралу:

$$j = \int |E_0 + \hat{\Psi}|^2 d^2r = \int E_0^2 d^2r + \int |\hat{\Psi}|^2 d^2r + 2 \operatorname{Re}(J_{\text{н}} e^{i\Omega t}), \quad (8)$$

где  $\hat{\Psi} = \Psi(\mathbf{r}, 0) e^{i\Omega t}$  — комплексная амплитуда объектной волны в плоскости детектора,  $\Omega$  — разностная частота принимаемой и опорной волн. При коррекции искажений фазы в опорном плече

$$j = \int |E_0 e^{i\Omega t} + \Psi|^2 d^2r = \int E_0^2 d^2r + \int |\Psi|^2 d^2r + 2 \operatorname{Re}(J_{\text{н}} e^{i\Omega t}). \quad (9)$$

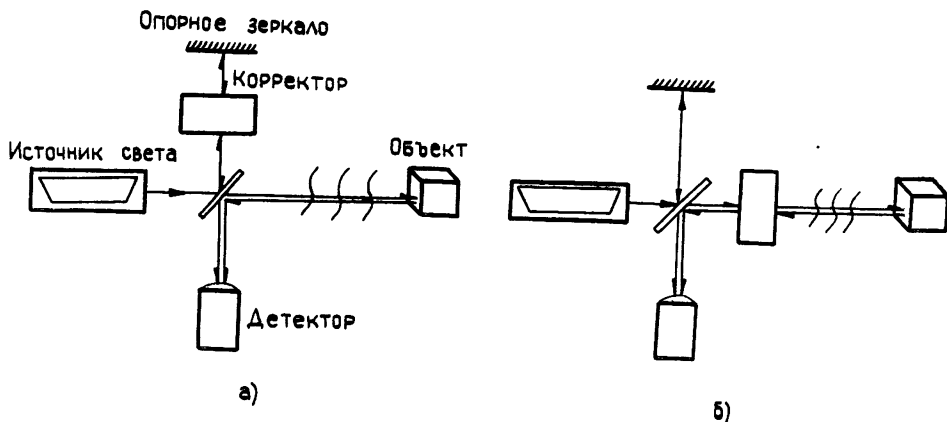


Рис. 3.

Интеграл  $J_{\text{н}} = \int E_0 e^{-i\Omega t} \Psi d^2r$  отличается от интерференционного критерия знаком фазы  $u$ . Это отличие связано с тем, что при коррекции в опорном плече наилучший результат достигается в том случае, когда фаза  $u$  полностью копирует профиль фазы  $\varphi(\mathbf{r})$  волны  $\Psi(\mathbf{r}, 0)$  ( $u = \varphi$ ). Если корректор расположен в объектном плече, то с его помощью фаза принимаемой волны подгоняется под плоский фазовый фронт опорной волны, что достигается при  $u = -\varphi$ . Оба случая анализируются одинаково, поэтому для определенности остановимся на первом варианте расположения корректора. Информативный сигнал пропорционален действительной части интерференционного критерия. Первые два слагаемых в (8) определяют дробовой шум в системе. Так как мощность опорной волны обычно существенно превышает мощность принимаемого поля ( $E_0 \gg |\Psi|$ ), то при расчете дробового шума в (8) и (9) будем учитывать лишь первые слагаемые. Среднеквадратичное значение флуктуаций фототока в единичной полосе частот пропорционально квадратному корню из среднего значения фототока  $j$ . Полезный сигнал на выходе фотодетектора пропорционален величине

$$\operatorname{Re}(J_{\text{н}} e^{i\Omega t}) = |J_{\text{н}}| \cos(\Omega t + \Phi),$$

где  $\Phi = \arg J_{\text{н}}$ . В зависимости от способа приема величину  $SNR$  вводят по-разному. При амплитудном приеме сигнала фаза  $\Phi$  не существенна и мгновенная величина отношения  $SNR$  по мощности будет пропорциональна  $|J_{\text{н}}|^2$ . Для среднего значения, таким образом, получим

$$\langle SNR \rangle = k \langle |J_{\text{н}}|^2 \rangle / \int |E_0|^2 d^2r)^{1/2}. \quad (10a)$$

При фазовой или частотной модуляции сигнала за меру его полезной составляющей можно принять спектральную амплитуду на частоте  $\Omega$ . При таком определении

$$\langle SNR \rangle = k \operatorname{Re} \langle J_n \rangle / \left( \int |E_0|^2 d^2 r \right)^{1/2}. \quad (106)$$

В этих формулах  $k$  — некоторый постоянный коэффициент, определяемый параметрами фотоприемника, а величина  $\int |E_0|^2 d^2 r$  не зависит от уровня адаптации. Поэтому эффективность адаптивного интерферометра может быть выражена через моменты критерия  $J_n$ . Оценка эффективности амплитудного гетеродинного приема по критерию, аналогичному (10а), приведена в работе [10].

**3. Дисперсия остаточной фазовой ошибки.** Найдем среднее значение интерференционного критерия в адаптивной системе, работающей в условиях атмосферной турбулентности. Усреднение производится по ансамблю реализаций случайного показателя преломления среды распространения излучения:

$$\langle J_n \rangle = \int E_0(\mathbf{r}) \langle |\Psi| e^{i(u+\varphi)} \rangle d^2 r. \quad (11)$$

Будем предполагать статистическую независимость флуктуаций амплитуды  $|\Psi|$  и фазы  $\varphi$  принимаемого поля. Кроме того, флуктуации нескомпенсированной корректором фазы  $\Delta = (u + \varphi)$  будем считать распределенными по нормальному закону. Используя эти предположения, для (11) получим

$$\langle J_n \rangle = \langle \Psi \rangle \int E_0(\mathbf{r}) \exp[-\sigma^2(\mathbf{r})/2] d^2 r. \quad (12)$$

Через  $\sigma^2(\mathbf{r})$  обозначена дисперсия остаточной фазовой ошибки  $\sigma^2 = \langle (u + \varphi)^2 \rangle$ . Таким образом, для расчета среднего значения интерференционного критерия необходимо определить дисперсию остаточной фазовой ошибки  $\sigma^2(\mathbf{r})$ .

Рассмотрим модальный корректор волнового фронта с круглой апертурой радиуса  $R$ . Пусть адаптивная система имеет  $M+1$  независимых каналов управления корректором. Функцию отклика корректора на единичное управляющее воздействие по  $m$ -му каналу обозначим через  $P_m(\mathbf{r})$ . Профиль фазы, формируемый с помощью корректора, можно представить в виде

$$u(\mathbf{r}) = \sum_{m=0}^M q_m P_m(\mathbf{r}). \quad (13)$$

Относительно функций отклика предположим следующее:

а) Система функций  $\{P_m(\mathbf{r})\}$  — ортонормированная в круге радиуса  $R$ :

$$\frac{1}{Q} \int P_m(\mathbf{r}) P_k(\mathbf{r}) d^2 r = \delta_{mk}, \quad Q = \pi R^2; \quad m, k = 0, 1, \dots, M. \quad (14a)$$

б) Функция отклика  $P_0(\mathbf{r})$  тождественно равна единице:

$$P_0(\mathbf{r}) \equiv 1. \quad (146)$$

Это условие означает компенсацию средней фазы в адаптивной системе. Выберем в качестве  $q_m$  взятые со знаком минус коэффициенты разложения фазы  $\varphi(\mathbf{r})$  по функциям отклика  $P_m(\mathbf{r})$ :

$$q_m = - (1/Q) \int \varphi(\mathbf{r}) P_m(\mathbf{r}) d^2 r, \quad m = 0, 1, \dots, M. \quad (15)$$

Можно показать [4], что такой выбор коэффициентов  $q_m$  является наилучшим в смысле среднеквадратичной аппроксимации фазы  $\varphi(\mathbf{r})$  с помощью системы функций  $P_m(\mathbf{r})$ . При больших  $M$  выбранный алгоритм переходит в алгоритм фазового сопряжения  $u(\mathbf{r}) = -\varphi(\mathbf{r})$ . Учитывая (13) и (15), ошибку компенсации фазы  $\Delta = u(\mathbf{r}) + \varphi(\mathbf{r})$  можно представить в форме

$$\Delta(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r}) - \frac{1}{Q} \sum_{m=0}^M P_m(\mathbf{r}) \int \varphi(\rho) P_m(\rho) d^2\rho. \quad (16)$$

Вычислим дисперсию ошибки коррекции фазы:

$$\sigma^2(\mathbf{r}) = \langle \Delta^2(\mathbf{r}) \rangle.$$

Предположим, что флуктуации фазы статистически однородны и изотропны, и воспользуемся соотношением

$$-B(\rho) = (1/2)[D(\infty) - D(\rho)], \quad (17)$$

связывающим корреляционную  $B(\rho) = \langle \varphi(\mathbf{r}) \varphi(\mathbf{r} + \rho) \rangle$  и структурную функцию фазы  $D(\rho) = \langle [\varphi(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r} + \rho)]^2 \rangle$  [11]. В результате преобразований для  $\sigma^2(\mathbf{r})$  получим следующее выражение:

$$\sigma^2(\mathbf{r}) = \frac{1}{Q} \sum_{m=0}^M P_m(\mathbf{r}) F_m(\mathbf{r}) - \frac{1}{2Q^2} \sum_{m,k=0}^M P_m(\mathbf{r}) P_k(\mathbf{r}) G_{mk}, \quad (18)$$

где

$$F_m(\mathbf{r}) = \int P_m(\rho) D(|\mathbf{r} - \rho|) d^2\rho, \quad G_{mk} = \int P_k(\rho) F_m(\rho) d^2\rho.$$

При вычислении  $\sigma^2(\mathbf{r})$  использовались соотношения (14а), (14б) и (17).

**4. Расчет эффективности адаптации.** Выражение (18) исследовалось численно. Структурная функция флуктуаций фазы задавалась в виде [12]

$$D(r) = 6,88(r/r_0)^{5/3},$$

где  $r_0$  — радиус когерентности фазы рассеянного поля, зависящий от длины трассы и состояния атмосферы. В качестве функций отклика корректора использовались полиномы Цернике, удовлетворяющие соотношениям (14). Вычисления производились для первых 10 полиномов, описывающих простейшие aberrации оптических систем.

На рис. 4а для различного числа степеней свободы корректора  $M$  показано распределение дисперсии остаточной ошибки  $\sigma^2(\mathbf{r}) / (2R/r_0)^{5/3}$  при удалении от центра апертуры к ее периферии. Приведенные результаты соответствуют поведению функции  $\sigma(r, \theta)$  при  $\theta = 0$ , где  $\theta$  — угол в полярной системе координат. Кривая 1 получена при вычитании средней фазы:  $M=0$  ( $P_0(\mathbf{r}) = 1$ ). Этот результат может быть также использован для оценки эффективности поршневого сегментированного зеркала. Компенсация наклонов волнового фронта ( $P_1 = 2r \cos \theta$ ,  $P_2 = 2r \sin \theta$ ) приводит к существенному уменьшению значения  $\sigma^2$  на периферии корректора (кривая 2,  $M=2$ ). При коррекции наклонов и дефокусировки ( $M=3$ ,  $P_3 = (2r^2 - 1) \sqrt{3}$ ) дисперсия ошибки коррекции уменьшается в основном в центре апертуры. Результаты компенсации aberrаций более высокого порядка приведены на рис. 4б (в ином, по сравнению с рис. 4а, масштабе). Кривая 4 соответствует компенсации наклонов, дефокусировки и астигматизма ( $M=5$ ,  $P_4 = \sqrt{6} r^2 \sin 2\theta$ ,  $P_5 = \sqrt{6} r^2 \cos 2\theta$ ). Результаты компенсации

для  $M=10$  представлены кривой 5 на рис. 4б. При вычислении среднего значения интерференционного критерия (12) амплитуда поля  $E_0$  в пределах апертуры  $r \leq R$  считалась постоянной. На рис. 5а показана зависимость среднего значения интерференционного критерия  $\langle J_M \rangle$

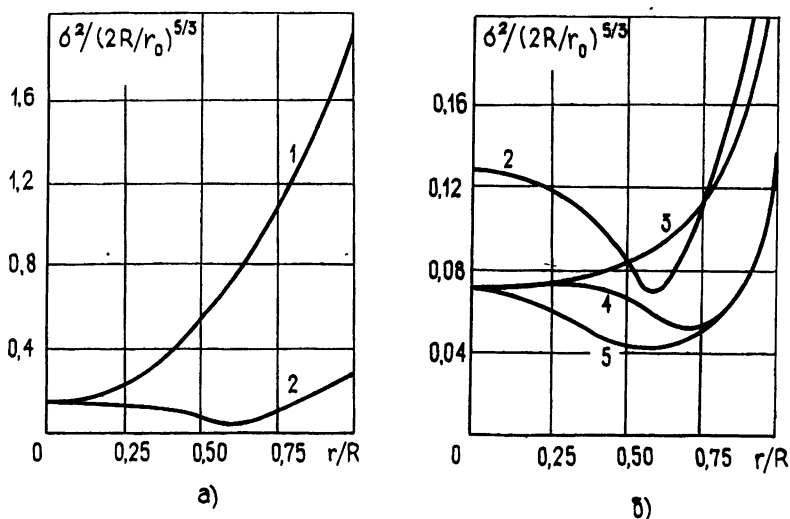


Рис. 4.

(нормированного на его оптимальное значение  $J_0$ ) от диаметра  $D=2R$  передающей апертуры. В соответствии с (6) для точечного объекта эта величина равна числу Штреля. Кривые 1—5 на рис. 5б показывают относительное изменение числа Штреля при увеличении числа степеней свободы корректора  $M$  (1— $D/r_0=5$ , 2— $D/r_0=4$ , 3— $D/r_0=3$ , 4— $D/r_0=2$ , 5— $D/r_0=1$ ).

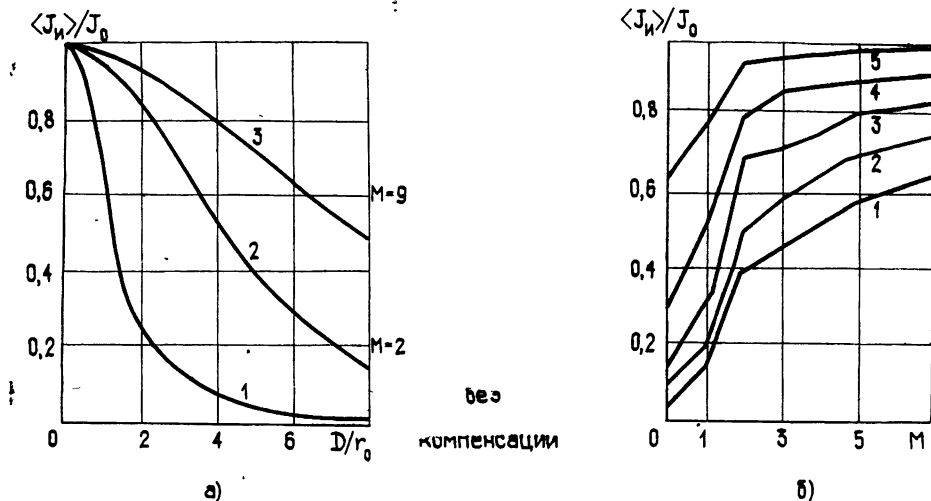


Рис. 5.

Рассмотрим теперь отношение сигнал/шум в системах оптической связи с фазово-частотной модуляцией и в адаптивных интерферометрах с модальным корректором. Результат существенно зависит от расположения корректора волнового фронта. На рис. 6 показано поведение  $\langle SNR \rangle$  в зависимости от диаметра приемной апертуры при расположении корректора в опорном плече. Расчет проводился по формуле (106).

Отношение  $\langle SMR \rangle$  позволяет судить о корреляционных свойствах флуктуаций принимаемой волны в адаптивной системе. Оценкой пространственного радиуса когерентности поля при адаптации может служить размер оптимальной апертуры (т. е. то значение  $D$ , при котором достигается максимум  $\langle SMR \rangle$ ). С увеличением  $M$  оптимальный размер апертуры возрастает (кривые 1—5 на рис. 6). При расположении корректора в объектном плече существенно возрастает отношение  $\langle SNR \rangle$  (рис. 7). Это связано с тем, что в этом случае адаптивная система позволяет не только обеспечить подобие формы фазы интерферирующих волн, но и сфокусировать излучение на объект [9].

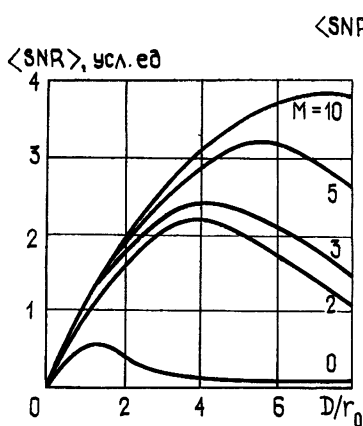


Рис. 6.

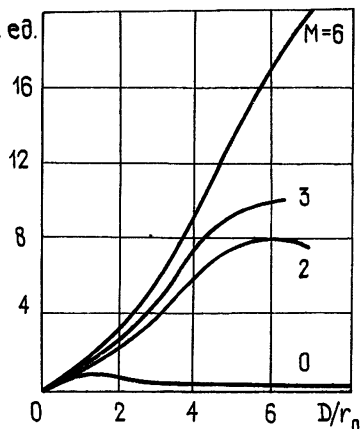


Рис. 7.

**5. Оптимизация числа приводов.** Полученные зависимости  $\sigma^2(\mathbf{r})$  позволяют рассчитать эффективность составных многоэлементных корректоров, каждая из субапертур которых является корректором с одной степенью свободы или «поршнем», управляемым по положению и наклону (3 степени свободы). В случае простого поршневого корректора следует воспользоваться для оценки  $J_n$  зависимостью, представленной кривой 1 на рис. 5а. Для оценок, однако, удобнее иметь аналитическую зависимость критерия  $J_n$  от размера  $D$  субапертуры. Как показали численные расчеты, для значений  $D/r_0 \leq 1$  удовлетворительно выполняется приближенное соотношение

$$J_n/J_0 \approx \exp\left(-\frac{\sigma_\varphi^2}{2}\right), \quad (19)$$

где  $\sigma_\varphi^2$  — средняя по апертуре квадратичная ошибка компенсации фазы. Для  $D/r_0=1$  эта оценка дает ошибку 15%, и ее точность быстро возрастает при уменьшении отношения  $D/r_0$ . При достаточно малых  $D/r_0$  формула (19) справедлива и для других функций отклика  $P_m(\mathbf{r})$ . Из (19) следует известная [13] оценка числа Штреля по значению квадратичной погрешности коррекции:

$$S \approx 1 - \sigma_\varphi^2, \quad \sigma_\varphi^2 \leq 0,5. \quad (20)$$

Пользуясь этим соотношением, можно получить оценку числа необходимых субапертур в условиях атмосферной турбулентности. В работе [4] получены значения  $\sigma_\varphi^2$  для квадратной субапертуры со стороны  $r_c$  и для нескольких практически реализуемых видов функции отклика: 1) параллелепипед — составные корректоры поршневого типа, 2) «пирамида» — поршни с наклоном, 3) «экспериментальная» функция —



наблюдается у монолитных пьезоэлектрических корректоров (МПЗ), 4) «гауссова» — наблюдается у тонких деформируемых зеркал. Во всех случаях

$$\sigma_{\varphi}^2 = \alpha (r_c/r_0)^{5/3}, \quad (21)$$

соответствующие значения коэффициента  $\alpha$ , вычисленные по данным работы [4], представлены в табл. 1.

При разбиении круглой апертуры диаметром  $D$  на  $N$  квадратных субапертур  $\pi D^2/4 \simeq N r_c^2$ . Поэтому, используя (21) и (20), получим

$$N = \frac{\pi}{4} \left( \frac{\alpha}{1-S} \right)^{6/5} \left( \frac{D}{r_0} \right)^2. \quad (22)$$

Формула (22) определяет число приводов, необходимое для достижения требуемого качества коррекции в зависимости от отношения  $D/r_0$ . Оценки числа  $N$  по формуле (22) показывают, что при  $D/r_0 > 1$  для достижения требуемого качества коррекции необходимо число каналов управления может оказаться весьма большим и трудно реализуемым.

Для снижения общего числа приводов можно использовать системы, состоящие из нескольких корректоров, каждый из которых компенсирует какую-либо одну aberrацию низшего порядка, и одного

(основного) корректора мелко-масштабных искажений. Рассмотрим двухступенчатую систему — корректор наклонов волнового фронта + основной корректор — и трехступенчатую систему корректоров — наклоны + дефокусировка + мелко-масштабные искажения. Достоинством использования корректоров низших aberrаций является достаточно простая реализуемость и малое число необходимых приводов: наклоны — 2 привода, дефокусировка — 1 привод. В то же время многоступенчатая система позволяет значительно уменьшить

необходимое число приводов основного корректора и всей системы в целом за счет уменьшения остаточной дисперсии флуктуаций фазы, что выражается умножением параметра  $\alpha$  в (22) на коэффициент  $\beta < 1$ . Величина коэффициента  $\beta$  может быть вычислена на основании результатов работы [14], в которой приводится разложение искажений волнового фронта, вызванных турбулентностью атмосферы, по полиномам Цернике. Значения коэффициента  $\beta$  для случая коррекции низших классических aberrаций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Без коррекции	Коррекция наклонов	Наклоны + дефокусировка
$\beta_1 = 1$	$\beta_2 = 0,13$	$\beta_3 = 0,109$

На основании данных табл. 2 и формулы (22) легко оценить необходимое число приводов основного корректора в многоступенчатой системе:

$$N_{2,3} \left( S, \frac{D}{r_0} \right) \cong N \left( S, \frac{D}{r_0} \right) (\beta_{2,3})^{6/5}. \quad (23)$$

Отсюда для общего числа приводов получаем

$$N_2 \cong 0,086N + 2 \quad (24)$$

— для двухступенчатой системы и

$$N_3 \cong 0,068N + 3 \quad (25)$$

— для трехступенчатой системы. Отметим, что полученные оценки учитывают только ошибки аппроксимации волнового фронта, что справедливо в случае преобладания этих ошибок над ошибками измерения волнового фронта и динамическими ошибками слежения. Таким образом, использование многоступенчатых схем коррекции позволяет уменьшить суммарное число приводов более чем на порядок и упростить практическую реализацию системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бакут П. А., Логинов В. А. — Квантовая электроника, 1982, 9, № 6, с. 1167.
- 2 Wang J. Y. — J. Opt. Soc. Am., 1977, 67, p. 383.
- 3 Wang J. Y. — Appl. Opt., 1978, 17, № 6, p. 2580
- 4 Hudgin R. — J. Opt. Soc. Am., 1977, 67, p. 393.
- 5 Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973, с. 425.
- 6 Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. — Квантовая электроника, 1980, 7, № 3, с. 500.
- 7 Саичев А. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 9, с. 1290.
- 8 Лукин В. П. — Квантовая электроника, 1981, 7, № 10, с. 2145.
- 9 Воронцов М. А., Пруидзе Д. В., Шмальгаузен В. И. — Квантовая электроника, 1982, 9, № 7, с. 1366.
- 10 Wang J. Y., Markey J. K. — J. Opt. Soc. Am., 1978, 68, № 1, p. 78.
- 11 Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. — М.: Наука, 1978
- 12 Фрид Д. — ТИИЭР, 1967, 55, № 11, с. 62.
- 13 Mahajan V. N. — J. Opt. Soc. Am., 1981, 71, № 1, p. 75.
- 14 Noll R. J. — J. Opt. Soc. Am., 1976, 66, p. 207.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
18 апреля 1983 г.

#### EFFICIENCY OF ADAPTIVE OPTICAL SYSTEMS IN TURBULENT ATMOSPHERE

*M. A. Vorontsov, A. V. Koryabin, V. I. Shmal'gauzen*

Quality of adaptive optic systems performance is usually estimated by Strehl ratio. In the paper presented an interference criterion is used for the purpose, that enables one to analyze both receiving and transmitting systems from the same view-point. Interference criterion is shown to produce Strehl factor, signal-to-noise ratio in optical communication systems with any form of modulation, and quality of adaptive interferometer performance. Calculations were made for systems with modal correctors of the wave front. Corrector was suggested to produce  $M$  of the first Zernike polynomials. For  $M=0, 1, \dots, 10$  a spatial distribution of an average phase compensation error is calculated. Results obtained may also be used for zonal corrector design.