ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том XXIX, № 6 РАДИОФИЗИКА 1986

УДК 535. 416. 3

ПРОХОЖДЕНИЕ СВЕТОВОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ТОНКИЙ СЛОЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ И СЛУЧАЙНЫМИ ФАЗОВЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЕНСАЦИИ

А. П. Сухоруков, В. В. Тимофеев, В. А. Трофимов

Анализируется степень компенсации регулярных и случайных фазовых искажений оптического излучения, прошедшего слой нелинейной среды. Рассматриваются адаптивные системы, способные компенсировать конечное число случайных и регулярных аберраций. Определены дисперсии и корреляции случайных аберрационных мод. Получены выражения для оценки эффективности компенсации регулярных и случайных искажений. Выявлены условия преобладания искажений пучка за счет нелинейного самовоздействия над его искажениями из-за турбулентности. Получено условие эффективного отслеживания фазовых флуктуаций.

В последние годы интенсивно исследуется проблема компенсации нелинейных искажений световых пучков (см., например, [1–6]). Как правило, в подавляющем большинстве работ, относящихся к ее решению, анализировалась степень компенсации либо регулярных амплитудно-фазовых искажений, либо случайных, но в линейной среде. Однако известно, что оптическое излучение, прошедшее атмосферный слой, претерпевает также действие турбулентности. Сложность расчета нелинейного самовоздействия пучка в условиях турбулентной среды делает необходимым разработку приближенных (упрощенных) методов анализа амплитудно-фазовых искажений, один из которых предложен в [7]. В настоящей работе исследуется эффективность компенсации как нелинейных регулярных, так и случайных фазовых искажений светового пучка, прошедшего тонкий слой среды.

Данную работу условно можно разделить на две части. В первой из них рассматривается коррекция искажений без учета динамики установления реальных алгоритмов, которые (см. вторую часть работы) вносят свои ограничения на качество компенсации нелинейных искажений. Поэтому полученные в первой части работы выражения для ширины пучка, его центра тяжести и пиковой интенсивности дают оценку предельных возможностей адаптивного управления. Целесообразность такого подхода в решении данной проблемы, на наш взгляд, не вызывает сомнений. Вместе с тем отметим, что за пределами статьи остался целый ряд вопросов, связанных с влиянием ограчичений на волновой фронт на качество компенсации, которые, как известно [8], изменяют оптимальные значения параметров, быстродействие системы и т. д. Предстоит также выяснить особенности коррекции волнового фронта на перемещающийся приемник [9] при его расположении в толще турбулентной нелинейной среды. Очевидно, в рамках одной статьи невозможно рассмотреть все эти проблемы.

1. Основные уравнения и постановка задачи. Как было показано в [7], для моментов интенсивности светового пучка, прошедшего фазовый экран, справедливы следующие соотношения:

$$\langle x\rangle_z = \varphi_1(S) = \frac{\bar{z}}{2Q^2}\iint\limits_{-\infty}^{\infty} f^2(x, y)\, S'_x(x, y)\, dxdy\,; \tag{1}$$

$$\langle x^2\rangle_z = \langle x^2\rangle_0 + \frac{\bar{z}^2}{4Q^2}\int\!\!\int_{-\infty}^{\infty} (f'_x)^2\,dxdy + \\ + \frac{\bar{z}^2}{2Q^2}\int\!\!\int_{-\infty}^{\infty} f^2\left(2xS'_x + \frac{\bar{z}}{2}(S'_x)^2\right)dxdy. \tag{2}$$

Здесь $\bar{z}=2z/ka^2$, z — расстояние до сечения, в котором расположен приемник с центром в точке x_1, y_1, k — волновое число, a — начальный радиус пучка, f — его профиль с нормой Q, $S=S_{\text{упр}}+S_{\text{р}}+S_{\text{ф}}$ — фаза пучка на выходе нелинейного слоя, вносящего регулярные $S_{\text{р}}$ и случайные $S_{\text{ф}}$ фазовые искажения, $S_{\text{упр}}$ — формируемый адаптивной системой волновой фронт, равный

$$S_{\text{упр}} = \sum_{i,j}\theta_{ij}\Phi_{ij}(x, y), \tag{3}$$

θ_{ij} — управляющие коэффициенты, Φ_{ij} — моды зеркала. Поперечные координаты x, y, а также моменты $\langle x\rangle_z$, $\langle x^2\rangle_z$ отнормируем на a, а начало координат совместим с центром пучка. Тогда, используя (1), (2), легко записать [7] выражения для квадратов радиусов пучка по осям x, y (обозначим соответственно a_x^2, a_y^2) и общей ширины — d_z^2.

В линейной однородной среде минимальное значение (дифракционный предел) квадрата ширины пучка равно

$$d^2 = \frac{\bar{z}^2}{4Q^2}\int\!\!\int_{-\infty}^{\infty}[(f'_x)^2 + (f'_y)^2]\,dxdy, \tag{4}$$

и достигается оно при следующем волновом фронте:

$$S = -(x^2 + y^2)/\bar{z} + \theta_{10}x + \theta_{01}y, \tag{5}$$

где θ_{10}, θ_{01} — соответственно его наклоны по осям x, y, если центр приемника находится не на оси пучка (x_1, $y_1\neq 0$). Следовательно, при оценке эффективности управления необходимо сравнивать значение дифракционного предела (или обратной к нему величины, характеризующей интенсивность) с соответствующими достигнутыми при оптимальных параметрах значениями критериев качества компенсации. В качестве последних целесообразно использовать величины

$$J_{\text{а}} = d_z^2,\quad J_{\text{ц}x} = (\langle x\rangle_z - x_1)^2,\quad J_{\text{ц}y} = (\langle y\rangle_z - y_1)^2. \tag{6}$$

Отметим, что в (6) необходимо провести усреднение по реализациям, которое будем обозначать чертой сверху. При этом $\bar{S}_{\text{ф}}$ естественно считать равным нулю: $\bar{S}_{\text{ф}}=0$.

При анализе качества компенсации фазовых искажений светового пучка следует различать два случая. Первый: быстродействие адаптивной системы существенно меньше времени флуктуаций фазы, и, таким образом, она компенсирует только регулярную составляющую. Второй случай соответствует ситуации, когда имеется возможность отрабатывать данную реализацию $S_{\text{ф}}$, считая, что за время выработки управляющего сигнала $S_{\text{ф}}$ не успевает измениться. Рассмотрим отдельно каждый случай.

2. Компенсация регулярных искажений. Для краткости записи введем следующие функционалы:

$$\varphi_{20,02}(S) = \int\!\!\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x, y)\begin{Bmatrix} xS'_x/\langle x^2\rangle_0 \\ yS'_y/\langle y^2\rangle_0\end{Bmatrix} dxdy/2Q^2, \\ R_0(S) = \int\!\!\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x, y)\,[(S'_x)^2 + (S'_y)^2]\,dxdy/Q^2, \tag{7}$$

и будем анализировать выражения только для $\langle x\rangle_z$ и $J_{цx}$ ($\langle y\rangle_z$, $J_{цy}$ легко получаются из $\langle x\rangle_z$, $J_{цx}$ с помощью формальной замены $x\to y$, $\frac{\partial}{\partial x}\to\frac{\partial}{\partial y}$ и т. д.). Тогда, проводя усреднение в (1), (2), (4), (6) и учитывая независимость $S_{упр}$ от $S_ф$, получим следующие выражения для среднего квадрата радиуса и положения центра пучка, среднего квадрата его отклонения от центра приемника:

$$\overline{\langle x\rangle}_z=\varphi_1(\overline{S_р}),\quad \overline{J}_{цx}=(\varphi_1(\overline{S_р})-x_1)^2+\overline{\varphi_1^2(S_ф)},$$

$$\overline{d_z^2}=d^2+\langle x^2\rangle_0(1+2\bar z\varphi_{20}(\overline{S_р}))+\langle y^2\rangle_0(1+2\bar z\varphi_{02}(\overline{S_р}))+ \tag{8}$$

$$+\frac{\bar z^2}{4}\Big(R_0(\overline{S_р})-\sum_{1,2}\varphi_{1,2}^2(\overline{S_р})+\overline{R_0(S_ф)}-\sum_{1,2}\overline{\varphi_{1,2}^2(S_ф)}\Big),$$

где (еще раз напомним) индекс 2 относится к оси y, $\overline{S_р}=S_р+S_{упр}$.

Из (8) можно сделать следующие выводы: во-первых, среднее положение центра тяжести светового пучка не зависит от $S_ф$, во-вторых, каждая из величин $\overline{J}_{цx}$, $\overline{J}_{цy}$, $\overline{d_z^2}$ представляет собой сумму слагаемых, зависящих либо от регулярной, либо от флуктуирующей составляющих. При этом последняя во всех случаях приводит к дополнительному уширению пучка и блужданию его центра тяжести. Еще один важный вывод состоит в том, что алгоритмы компенсации регулярных искажений по критериям минимума $\overline{J}_{цx}$, $\overline{J}_{цy}$, $\overline{d_z^2}$ не зависят от $S_ф$, но флуктуирующая составляющая определяет степень достижимой компенсации.

Рассмотрим ряд примеров. Пусть $S_ф$ — гауссова случайная величина с функцией корреляции $\overline{S_ф(x,y)S_ф(x',y')}=\sigma^2\exp\left[-\frac{(x-x')^2+(y-y')^2}{\rho_к^2}\right]$, где $\rho_к=r_к/a$, $r_к$ — радиус корреляции, σ — дисперсия флуктуаций. Тогда среднее значение квадрата ширины гауссова ($f_г$) и трубчатого ($f_{тр}$) пучков при полной компенсации регулярных искажений равно*

$$\overline{d_z^2}=\bar z^2+2\bar z^2\sigma^2\frac{(2+\rho_к^{-2})}{(1+\rho_к^{-2})^2\rho_к^{+4}}\begin{cases}1, & f_г\\ \dfrac{1}{4(1+\rho_к^{-2})^2}, & f_{тр},\end{cases}$$

а для $J_{цx}$ имеем

$$\overline{J}_{цx}=\frac{\bar z^2}{4}\left(\theta_{10}+\frac{\theta_{нл}}{Q^4}\iint\limits_{-\infty}^{\infty}f^4\,dx\,dy-\frac{2x_1}{\bar z}\right)+\overline{\varphi_1^2(S_ф)},$$

где $\theta_{нл}$ — дополнительная расходимость оптического излучения на выходе из слоя нелинейной среды [7], $S_{нл}=\theta_{нл}\int\limits_{-\infty}^{x}f^2dx$. Следовательно, блуждание центра пучка определяется свойствами случайной величины и его профилем. Однако известно [10,11], что в регулярных средах (в частности, в движущейся нелинейной среде) переход к негауссовым профилированным пучкам позволяет существенно уменьшить боковое смещение их центра тяжести. Поэтому представляет интерес выяснить целесообразность использования гипергауссовых $f_г^2=\exp(-2x^m-2y^m)$ и гипертрубчатых $f_{тр}^2=(x^m+y^m)f_г^2$ световых пучков в условиях турбулентной атмосферы. Ниже приведена зависимость $\overline{\varphi_1^2(S_ф)}$ от $m(\rho_к=1)$:

$$\overline{\varphi_1^2}=\frac{\bar z^2\sigma^2}{2}10^{-1}\{2;\ 1{,}6;\ 1{,}3;\ 1{,}2;\ 1{,}1\},\ f_г^2=\exp(-4x^m-4y^m). \tag{9}$$

*Здесь и далее в этом разделе d_z измеряется в $a/\sqrt{2}$.

Как видим, результат говорит сам за себя. Отметим еще, что $R_0(S_\Phi)$ не зависит от профиля пучка, но в выражение для его ширины входит также $\overline{\varphi_{1,2}^2(S_\Phi)}$. Сравнивая вклад в уширение и смещение центра пучка величины нелинейности [12] и флуктуаций, можно выбрать для данных условий оптимальный профиль и очередность компенсации.

Как известно, на практике адаптивные системы компенсируют лишь часть аберраций. Зависимость критериев качества от числа компенсируемых регулярных аберраций рассмотрена в [7]. Поэтому далее ограничимся анализом коррекции случайных флуктуаций, отметив, что дифракционный предел при полном устранении нелинейных искажений в турбулентной среде увеличивается в $1+\sigma^2\rho_\text{к}^{-4}(2+\rho_\text{к}^{-2})/(1+\rho_\text{к}^{-2})^2$ раз, а дисперсия смещения центра тяжести пучка из-за флуктуаций фазы равна

$$\overline{\varphi_1^2(S_\Phi)} = \bar{z}^2\sigma^2 \begin{cases}\rho_\text{к}^2/(2(1+\rho_\text{к}^2)^2), & f_\text{г} \\ \rho_\text{к}^2(1+2\rho_\text{к}^2)/(4(1+\rho_\text{к}^2)^4), & f_\text{тр}\end{cases}. \qquad (10)$$

В результате этого при полной компенсации регулярных искажений интенсивность на приемнике уменьшается по сравнению со случаем отсутствия случайных флуктуаций в следующее число раз:

$$\eta = 1 + \frac{\sigma^2(1+2\rho_\text{к}^2)}{(1+\rho_\text{к}^2)^2\rho_\text{к}^2}\exp\{2^{-1}\rho_\text{к}^4\sigma^2[\rho_\text{к}^2(1+\rho_\text{к}^2)^2+\sigma^2 2(1+2\rho_\text{к}^2)]^{-1}\}. \qquad (11)$$

3. Эффективность управления при частичной компенсации случайной составляющей. Одним из наиболее важных вопросов, представляющих интерес для адаптивной оптики, является модовый состав флуктуаций и их дисперсия. Для определения последней представим флуктуирующую составляющую в виде ряда по базисным функциям, выбор которых определяется геометрией задачи [7]. Так, при наличии аксиальной симметрии в качестве Φ_{pq} выбирают полиномы Лагерра, в противном случае Φ_{pq} задаются в виде полиномов Эрмита $H_p(\sqrt{2}x)\times H_q(\sqrt{2}y)$. Тогда

$$S_\Phi(x,y) = \sum_{p,q} b_{pq}H_p(\sqrt{2}x)H_q(\sqrt{2}y), \qquad (12)$$

и для дисперсии σ_{pq} случайных коэффициентов b_{pq} разложения S_Φ имеем

$$\sigma_{pq}^2 = \overline{b_{pq}^2} = \frac{\sigma^2(2p)!(2q)!\rho_\text{к}^2}{(p!)^3(q!)^3 2^{3(p+q)}(1+\rho_\text{к}^2)^{1+p+q}}. \qquad (13)'$$

Из (13) можно сделать несколько важных выводов. Во-первых, дисперсия отдельных мод определяется величиной $\sigma^2\rho_\text{к}^2/(1+\rho_\text{к}^2)$. Во-вторых, с ростом номера моды σ_{pq}^2 быстро убывают. Поэтому реальный вклад в уширение пучка и в блуждание его центра тяжести оказывают только низшие моды.

Представляет интерес анализ корреляции коэффициентов b_{pq}. Можно показать, что для нее справедливо следующее выражение:

$$K_{pp'qq'} = \overline{b_{pq}b_{p'q'}} = \frac{\sigma^2\rho_\text{к}^2(p+p')!(q+q')!T_{pp'}T_{qq'}}{(2^{3/2}(1+\rho_\text{к}^2)^{1/2})^{p+p'+q+q'}p!p'!q!q'!}\times$$
$$\times\left(\left(\frac{p+p'}{2}\right)!\left(\frac{q+q'}{2}\right)!\right)^{-1}, \qquad (14)$$

где функции $T_{pp'}, T_{qq'}$ равны либо 0, либо 1 и определяются следующим образом:

$$T_{pp'} = (\chi(p))^{(p+p')/2}\delta(\chi(p),\chi(p')), \qquad (15)$$

$$\chi(p)=\begin{cases}1, & p=2m\\ -1, & p=2m+1\end{cases},\quad \delta(a,b)=\begin{cases}1, & a=b\\ 0, & a\neq b\end{cases}.$$

Аналогичное выражение имеет место для $T_{qq'}$. Существенно, что четные и нечетные моды между собой не коррелируют. Это дает возможность отдельно осуществлять коррекцию наклонов и фокусировки. Из (14) также следует, что с ростом номера моды функция корреляции быстро уменьшается.

Перейдем теперь к анализу эффективности работы адаптивной системы, способной отрабатывать первые M_0 случайные и M регулярные аберрации. В этом случае для квадрата ширины первоначально гауссова пучка справедлива формула, аналогичная полученной в [7],

$$d_z^2=d^2+2\bar{z}^2\Big(\sum_{M_0+1\leqslant p+q\leqslant M} b_{pq}^2\, 2^{p+q}\, p!q!(p+q)+ + \sum_{p+q\geqslant M+1}(b_{pq}+C_{pq})^2 2^{p+q}\, p!\, q!\,(p+q)\Big), \tag{16}$$

где C_{pq} — коэффициенты разложения $S_{нл}$ по полиномам Эрмита (считаем, что система компенсирует также наклон). Усредняя (16) с учетом $\bar{S}_ф=0$ и используя (13), получим

$$\overline{d_z^2}=d^2+2\bar{z}^2\Big(\sum_{p+d\geqslant M+1} C_{pq}^2 p!\, q!\,(p+q)2^{p+q}+ + \sum_{p+q\geqslant M_0+1}\overline{b_{pq}^2}\, 2^{p+q}\, p!\, q!\,(p+q)\Big). \tag{17}$$

Из (17) следует, что $\overline{d_z^2}$ определяется нескомпенсированными случайными и регулярными аберрациями, причем вклад их не зависит друг от друга, а к оптимальным значениям управляющих коэффициентов при коррекции нелинейных искажений добавляются случайные b_{pq}. Отметим, что при компенсации M_0 случайных аберраций минимально достижимая ширина гауссова пучка равна

$$\overline{d_z^2}=\bar{z}^2\left(1+\frac{2\sigma^2(1+(M_0+1)\rho_к^2)}{\rho_к^2(1+\rho_к^2)^{M_0+1}}\right). \tag{18}$$

Как и следовало ожидать, эффективность компенсации определяется дисперсией флуктуаций и соотношением радиусов пучка и корреляции. Отметим, что компенсация только случайной фокусировки пучка приводит к уменьшению ширины в следующее число раз:

$$\eta=(1+\rho_к^2)\frac{(1+\rho_к^2)^2\rho_к^2+2\sigma^2(1+2\rho_к^2)}{(1+\rho_к^2)^3\rho_к^2+2\sigma^2(1+3\rho_к^2)}. \tag{19}$$

Из (19) следует, что для $\rho_к^2\ll 1$ в первом приближении $\eta=2$. Выигрыш в увеличении интенсивности при устранении также случайных наклонов определяется по (11).

Важно подчеркнуть, что влияние нелинейной расходимости на распространение первоначально гауссова светового пучка с плоским волновым фронтом при прохождении слоя движущейся среды и фазовых флуктуаций определяется отношением $\theta_{нл}$ к $2\sqrt{2}\sigma\rho_к/(1+\rho_к^2)$ — для смещения центра тяжести, $\theta_{нл}$ — к $2\sigma\sqrt{2+\rho_к^2}/((1+\rho_к^2)\rho_к)$ — для уширения пучка. Как видим, соотношения несколько различаются. Для оценки влияния флуктуаций на увеличения ширины пучка при отсутствии регулярного движения нелинейной среды необходимо воспользоваться результатами работ [7, 12].

В заключение данного пункта заметим, что результаты, полученные здесь, легко обобщить на случай компенсации искажений гибкими зеркалами с ограничениями на их профиль [8, 12].

4. Повышение пиковой интенсивности. Рассчитать поле на приемнике можно, воспользовавшись известной формулой

$$A(\bar{z}, x, y) = \frac{1}{\bar{z}} \iint f(\xi, \eta) \exp \left\{ iS(\xi, \eta) - \frac{i}{\bar{z}} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2] \right\} d\xi \, d\eta, \tag{20}$$

из которой следует, что максимальная интенсивность на оси достигается при обращении в нуль показателя экспоненты. Разлагая экспоненту в ряд и проводя усреднение, нетрудно получить для случая малых флуктуаций фазы следующую оценку уменьшения интенсивности за счет турбулентности:

$$\eta = 1/(1-\sigma^2)^2, \tag{21}$$

а для уменьшения из-за регулярной нелинейности в первом приближении имеем

$$\eta = \left[1 - \left(\iint f(\xi, \eta) S_{\text{р}}(\xi, \eta) \, d\xi \, d\eta \right)^2 \right]^{-1}. \tag{21a}$$

Сравнивая их для конкретных параметров пучка и среды, получим очередность компенсации регулярных и случайных искажений. Отметим, что (21), (21a) определяют, по существу, степень достижимой компенсации.

Если адаптивная система может отрабатывать мгновенные значения фокусировки и наклона волнового фронта, то поле на оси равно

$$\bar{A}(\bar{z}, 0, 0) = \frac{1}{\bar{z}} \iint f(\xi, \eta) \exp [iS_{\text{р}} + iS_{\text{упр}} - i(\xi^2+\eta^2)/\bar{z}] \times$$
$$\times [1 - (\sigma^2 - 2\overline{S_{\text{ф}}\,\theta_{20}}\xi^2 - 2\overline{S_{\text{ф}}\theta_{02}}\,\eta^2 + \overline{\theta_{10}^2}\xi^2 + \overline{\theta_{01}^2}\eta^2 + \overline{\theta_{20}^2}\xi^4 + \overline{\theta_{02}^2}\eta^4)] \, d\xi \, d\eta. \tag{22}$$

Следовательно, интенсивность на приемнике будет тем больше, чем сильнее корреляция случайной составляющей фазы и управляющих коэффициентов, которая определяется быстродействием системы.

5. Распространение частично когерентного оптического излучения в кубичной среде. Рассчитать ширину пучка, распространяющегося в кубичной среде, можно, используя ее связь с интегралом уравнения квазиоптики. В этом случае ширины сфокусированного гауссова и трубчатого пучков равны

$$\overline{a_{\text{г}}^2}(\bar{z}) = 1 + 2(32\bar{z}^2(32+16\alpha+8\theta^2)) - 8\theta\bar{z} + 8\bar{z}^2\sigma^2/\rho_{\text{к}}^2,$$
$$\overline{a_{\text{тр}}^2}(\bar{z}) = 3 + 2\bar{z}^2(32+3\alpha/2+24\theta^2) - 24\theta\bar{z} + 8\bar{z}^2\sigma^2/\rho_{\text{к}}^2 \tag{23}$$

и измеряются в единицах $a_{\text{г}}(0)$. Таким образом, при переходе к профилированному пучку роль флуктуаций в его относительном уширении уменьшается, и изменяется критическое значение нелинейности, при котором $a_{\text{тр}}(\bar{z})$ становится меньше $a_{\text{г}}(\bar{z})$. Следует подчеркнуть, что для частично когерентного оптического излучения остаются справедливыми полученные в [10, 11] выводы для профилированных световых пучков.

6. Динамическая компенсация. Теоретическое исследование особенностей адаптации при компенсации регулярных искажений на основе упрощенных моделей проводилось нами ранее в ряде работ (см., например, [4, 8, 9, 12]). Поэтому и ввиду ограниченности объема статьи здесь остановимся только на некоторых особенностях динамической компенсации флуктуаций на примере управления фокусировкой θ пучка. Соответствующую составляющую (см. (12)) флуктуаций обозначим через $\theta_ф$. В этом случае отработка θ при настройке адаптивной системы по минимуму ширины пучка осуществляется по закону [4]

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\tau_а}\left(\frac{1}{\bar{z}} + \theta_{пл} + B_ф(t) - \theta\right), \tag{24}$$

где $B_ф(t)$ — регистрируемое случайное значение $\theta_ф$, $\tau_а = 1/(2\gamma\bar{z}^2)$ — постоянная времени установления оптимальной фокусировки, γ — константа управления. Необходимость введения $B_ф(t)$ обусловлена, во-первых, конечным временем (τ_0) определения кривизны случайной линзы, во-вторых, инерционностью системы ее регистрации, характеризуемой временем $\tau_р$. Это приводит к следующему уравнению для $B_ф(t)$:

$$\tau_р \frac{dB_ф}{dt} + B_ф(t) = \theta_ф(t - \tau_0) \,. \tag{25}$$

Аналогичное (25) уравнение справедливо для $S_ф$. Отметим, что данная модель (24), (25) позволяет оценить влияние конечного быстродействия адаптивной системы на качество компенсации.

Прежде всего остановимся на случае идеальной регистрирующей системы $\tau_р = \tau_0 = 0$. Из (24), (25) следует, что для достаточно малой постоянной времени установления $\tau_а \ll 1$ отработка фокусировки пучка происходит по закону

$$\theta(t) \simeq \frac{1}{\bar{z}} + \theta_{пл} + \theta_ф - \tau_а \frac{\partial\theta_ф}{\partial t} \,. \tag{26}$$

В результате этого среднее значение ширины пучка на приемнике будет равно

$$\overline{d^2} = \overline{z^2}(1 + \tau_а^2 \overline{(\partial\theta_ф/\partial t)^2}) \,. \tag{27}$$

Предполагая, что $S_ф$ — стационарная случайная величина, из (27) получим

$$\overline{d^2} = \overline{z^2}\,[1 + (\tau_а/\tau_к)^2 \sigma_{20}^2], \tag{28}$$

где $\tau_к$ — время корреляции гауссова закона. Из сравнения (28) с значением ширины пучка при компенсации только регулярных искажений $\overline{d^2} = \overline{z^2}(1 + \sigma_{20}^2)$ нетрудно записать условие эффективности отслеживания $\theta_ф$:

$$\tau_а < \tau_к \,. \tag{29}$$

Физически (29) означает, что за время управления кривизна случайной линзы должна измениться незначительно. В противном случае управление неэффективно: вырабатываемая адаптивной системой фокусировка запаздывает относительно $\theta_ф$.

Следует заметить, что в некотором смысле данная ситуация аналогична случаю управления волновым фронтом на перемещающийся приемник [9, 13], поэтому целесообразно использовать алгоритмы с переменным γ_N, предложенные в [13]. Отметим, что при дискретном алгоритме управления можно записать аналогичное (29) условие, которое будет означать, сколько итераций успевает сделать система за время изменения $\theta_ф$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харди Дж. — ТИИЭР, 1978, 66, № 6, с. 31.
2. Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П. — Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1978, 42, № 12, с. 2547.
3. Ахманов С. А., Воронцов М. А., Кандидов В. П. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 1, с. 3.

4. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. — Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1982, **46**, № 10, с. 1933.
5. Лукин В. П., Матюхин В. Ф. — Квантовая электроника, 1983, **10**, № 2, с. 24.
6. Вдовин В. А., Сорокин Ю. М., Давыдов В. И. — Квантовая электроника, 1984, **11**, № 3, с 480.
7. Сухоруков А. П., Тимофеев В В., Трофимов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, **27**, № 12, с. 1514.
8. Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П., Трофимов В. А. — Квантовая электроника, 1984, **11**, № 4, с. 693.
9. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. — Вестник МГУ, физика и астрономия, 1985, **26**, № 2, с. 50.
10. Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П., Трофимов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, **27**, № 10, с. 1292.
11. Трофимов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, **28**, № 5, с. 624.
12. Сухоруков А. П., Тимофеев В. В., Трофимов В. А. — Квантовая электроника, 1986, **13**.
13. Сухоруков А. П., Трофимов В. А. — Квантовая электроника, 1985, **12**, № 8, с. 1617.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию 6 декабря 1984 г., после доработки 8 октября 1985 г.

PASSING OF A LIGHT BEAM THROUGH A THIN LAYER WITH NONLINEAR AND ACCIDENTAL PHASE DISTORTIONS. INVESTIGATION OF A POSSIBILITY OF THE COMPENSATION

A. P. Sukhorukov, V. V. Timofeev, V. A. Trofimov

The compensation of regular and accidental phase distortions of the optical radiation in thin layer is analysed. An adaptive systems can compensate some aberrations. The dispersion and the correlation of accidental aberrational modes is defined. The condition of an effective compensation of phase distortions is obtained.

ИНСТРУКЦИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ РЕФЕРАТОВ

1. В реферате кратко излагается основное содержание статьи. Реферат должен дать читателю представление о характере освещаемой работы, оригинальности постановки вопроса, методике проведения исследования и его основных результатах.

2. Реферату должно предшествовать библиографическое описание в следующем виде: название статьи, фамилия и инициалы автора, название журнала, где помещается статья. Текст реферата начинается непосредственно с изложения существа работы без повторения заголовка. Форма изложения материала не обязательно должна повторять форму изложения оригинальной статьи.

3. Если оригинал содержит большое количество цифровых данных, их следует обобщить и систематизировать.

4. Средний объем реферата 1,5—2 страницы машинописного текста, отпечатанного через два интервала на белой писчей бумаге обычного формата (30×21) в двух экземплярах с полем 4 см с левой стороны.

5. Таблицы, схемы, графики и пр. могут быть включены в том случае, если они отражают основное содержание работы или сокращают текст реферата. Сообщение о наличии в реферируемой работе таблиц, схем, графиков, фотографий, карт, рисунков необходимо давать в конце реферата. Например, табл. 2, илл. 10.

6. Формулы приводятся только в том случае, если они необходимы для понимания статьи. Громоздкие математические выражения помещать не следует. Формулы следует вписывать четко, не изменяя принятых в оригинале обозначений величин. Формулы и буквенные обозначения вписываются **черными чернилами во второй экземпляр**. Вписывание формул и буквенных обозначений, а также исправление замеченных опечаток в **первом экземпляре не делается.**

7. В конце реферата в квадратных скобках указывается название учреждения или предприятия, в котором автор реферируемой работы (если эти данные приводятся в статье) провел работу. Подпись автора и дату написания реферата следует ставить в левом нижнем углу на обоих экземплярах реферата.