

УДК 621.373.826

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОКУСИРОВКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОВФ
В МНОГОТАКТОВОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

В. Е. Киракосянц, В. А. Логинов, В. В. Слонов

Оценивается эффективность работы многотактового алгоритма ОВФ в задаче фокусировки лазерного излучения в случайно-неоднородной среде. Рассмотрены как "локальные" (на одном такте зондирования), так и "интегральные" (для всего интервала наблюдения) показатели эффективности алгоритма. Определены зависимости этих показателей от основных параметров адаптивной системы с ОВФ. В частности, показано, что для повышения эффективности ОВФ "зашумленного" сигнала необходимо осуществлять "настройку" схемы ОВФ на заданную локационную обстановку.

Применению ОВФ в различных областях науки и техники посвящено большое количество работ (например, монографии [1, 2] и библиография к ним). Однако очень мало исследований касается эффективности систем с ОВФ при наличии фонового (шумового) излучения от посторонних источников. Между тем, именно такая ситуация часто реализуется на практике. В частности, одна из потенциально эффективных областей применения ОВФ - лазерная локация и связь. В этих случаях возникает задача доставки излучения через слой случайно-неоднородной среды (обычно это турбулентная атмосфера Земли) на удаленный объект в условиях более или менее интенсивных фоновых помех.

Известно [3], что при единичном акте приема и переизлучения ОВФ "зашумленного" сигнала дифракционного качества доставляемого объекту излучения достичь не удается. В то же время, в связи с широким использованием импульсных лазеров на практике частично реализуется многотактовый режим зондирования, приема и переизлучения оптических сигналов. Возникает вопрос о динамике нарастания средней интенсивности излучения на объекте от такта к такту, об изменении при этом флуктуационных характеристик интенсивности и т. д. Эти и другие вопросы эффективности систем с ОВФ в многотактовом режиме работы рассматриваются в настоящей статье.

Как показано в работе [3], для эффективной передачи излучения на удаленный объект помимо простого переизлучения падающего на

устройство ОВФ поля необходимо выполнение следующих требований:

а) использование эффективной схемы выделения полезного сигнала из смеси с фоном;

б) введение дополнительного управления с целью фокусировки профильтированного поля на заданную дальность и излучения его в требуемом направлении.

Оба эти требования обеспечиваются с помощью устройства ОВФ, изображенного на рис. 1. На рисунке приняты следующие обозначения: А - приемно-передающая апертура Ω площади S , Л - линза с фокусным расстоянием F , З - затвор, обеспечивающий время экспозиции $T_{\text{стр}}$, ОКУ - оптический квантовый усилитель, Д - диафрагма Ω_m площади S_m , ОВФ-З - ОВФ-зеркало, l_m - расстояние от входной линзы до области Ω_m , в которой осуществляется ОВФ, О - объект наблюдения, ось Oz - оптическая ось системы.

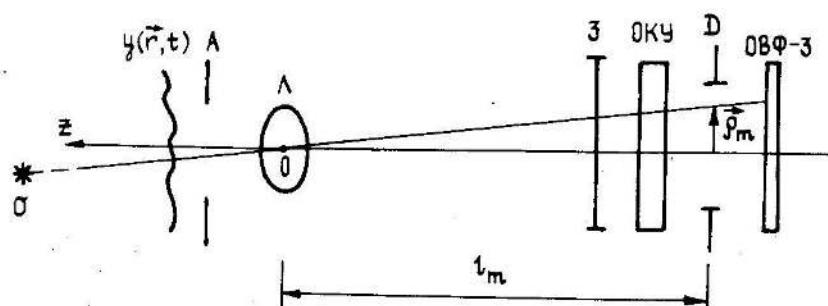


Рис. 1.

Представляя слой турбулентной атмосферы, прилегающей к апертуре, в виде "тонкого" амплитудно-фазового экрана, запишем принимаемое на m -м такте зондирования поле $y_m(\vec{r}, t)$ в виде

$$y_m(\vec{r}, t) = S_m(\vec{r}, t) + n_m(\vec{r}, t). \quad (1)$$

Первое слагаемое в (1) описывает отраженное от объекта поле

$$S_m(\vec{r}, t) = \operatorname{Re} E_m(t) \exp[\psi_m(z_m, \vec{\rho}_{0m}; 0, \vec{r}; \tau_m) - i\omega t + ik\vec{r}^2/2z_m - ik\vec{\theta}_m \vec{r}],$$

где $E_m(t)$ - случайная комплексная амплитуда сигнала, обусловленная всем предыдущим (до m -го такта) процессом управления и распространения излучения в турбулентной атмосфере, $\psi_m(z_m, \vec{\rho}_{0m}; 0, \vec{r}; \tau_m)$ - случайный набег комплексной фазы, связанный с распространением отраженного сигнала в турбулентной атмосфере от объекта с координатами $(z_m, \vec{\rho}_{0m})$ до точки $(0, \vec{r})$ апертуры Ω на m -такте; τ_m , z_m и $\vec{\theta}_m = \vec{\rho}_{0m}/z_m$ - момент приема сигнала, дальность и истинное угловое положение объекта на m -м такте, $k = 2\pi/\lambda$ - волновое

число, λ - длина волны излучения.

Второе слагаемое описывает шумовую составляющую принимаемого поля. Она обусловлена как внешним фоновым излучением, так и шумами суперлюминесценции в ОКУ (эта часть шумовой составляющей должна быть пересчитана ко входу системы). В дальнейшем для $u_m(\vec{r}, t)$ будем использовать модель гауссса δ -коррелированного случайного процесса со спектральной плотностью энергии N_0 .

Поле $u_m(\vec{r}, t)$ проходит через линзовую систему, затвор, ОВФ-зеркало. После диафрагмирования и усиления в ОКУ оно распространяется через оптическую систему в обратном направлении и излучается в атмосферу. Комплексная амплитуда сформированного таким образом поля в плоскости излучающей апертуры Ω имеет вид

$$u_m(\vec{r}, t) = \mu_m \int_0^t d\tau h^*(t - \tau) (k/2\pi l_m)^2 \exp[-ikr^2/2 (1/F - 1/l_m)] \times \\ \times \int_{\Omega_m} \exp[-ik\vec{r}(\vec{\rho} - \vec{\rho}_m)/l_m] d^2\rho \int_{\Omega} \exp[ikr_1^2(1/F - 1/l_m)/2 + \\ + ikr_1(\vec{\rho} - \vec{\rho}_m)/l_m] Y_m(\vec{r}_1, \tau) d^2r_1, \quad (2)$$

где μ_m - коэффициент усиления ОКУ на m -м такте, $h(t)$ - импульсная реакция ОВФ-зеркала, характеризующая его селективные (по частоте) свойства, $\vec{\rho}_m$ - координаты изображения объекта наблюдения в плоскости Ω_m , $*$ - знак комплексного сопряжения.

При записи выражения (2) использовано представление о селективных свойствах ОВФ-зеркала, обоснованное и изложенное в [2]. Предполагается также, что рассматривается достаточно общий случай движущегося объекта. Обычно истинные координаты объекта, т. е. дальность z_m и угловое положение $\hat{\theta}_m = \vec{\rho}_{0m}/z$ неизвестны. Будем считать, что информация о параметрах z_m , θ_m , необходимая для правильной "настройки" устройства ОВФ на каждом такте, извлекается из отраженного сигнала с помощью вспомогательного локационного канала. Соответствующие оценки параметров $\hat{\theta}_m$ и z_m обозначим через $\hat{\theta}_m$ и \hat{z}_m . Естественно, что качество ОВФ будет зависеть (и, как увидим далее, в существенной степени) от ошибок оценивания $\Delta\hat{\theta}_m = \hat{\theta}_m - \hat{\theta}_m$ и

$$\Delta z_m = z_m - \hat{z}_m.$$

При фокусировке излучения на заданную для m -го такта дальность \hat{z}_m следует положить $1/F = 1/l_m = 1/\hat{z}_m$. При этом $\vec{\theta}_m = \vec{r}_m/l_m$ - предполагаемое направление на объект, а выражение (2) преобразуется к виду

$$u_m(\vec{r}, t) = \mu_m v_m(\vec{r}, t) \exp\left(-ikr^2/2\hat{z}_m + ik\vec{\theta}_m \cdot \vec{r}\right), \quad m = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Здесь детерминированный множитель $\exp(-ikr^2/2\hat{z}_m + ik\vec{\theta}_m \cdot \vec{r})$ описывает фокусировку поля на заданную дальность и излучение его в требуемом направлении, а случайный множитель

$$v_m(\vec{r}, t) = \int_0^t d\tau h(t - \tau) \int_{\Omega} d^2 r_1 G_m(\vec{r}, \vec{r}_1) y_m(\vec{r}_1, \tau) \quad (4)$$

может быть интерпретирован как комплексная амплитуда поля на выходе пространственно-временного фильтра с импульсной реакцией $h(t)$ и пространственным откликом $G_m(\vec{r}, \vec{r}_1) = \exp(-ikr_1^2/2\hat{z}_m + ik\vec{\theta}_m \cdot \vec{r}_1) g_m(\vec{r} - \vec{r}_1)$,

$$\text{где } g_m(\vec{r}) = 1/\lambda^2 l_m^2 \int_{\Omega_m} \exp(-ik\rho \vec{r}/l_m) d^2 \rho \quad [4].$$

Излучаемое поле на всех тахах зондирования (за исключением первоначального, $m = 1, 2, \dots$) описывается формулой (3). При первоначальном "подсвете" ($m = 0$) объекта

$$u_0(\vec{r}, t) = U_0 u(t) \exp(-ikr^2/2\hat{z}_0 + ik\vec{\theta}_0 \cdot \vec{r}_0), \quad (3a)$$

где $u(t)$ - регулярная временная модулирующая функция зондирующего импульса, U_0 - амплитуда, определяющая энергетический потенциал схемы на начальном этапе работы.

Представленные выражения (1) - (4) дают возможность легко вычислить простейшую характеристику эффективности работы алгоритма ОВФ - коэффициент передачи средней энергии излучения на текущем такте зондирования:

$$k_m = \langle \bar{\epsilon}_{om} \rangle / \langle \bar{\epsilon}_{im} \rangle, \quad (5)$$

где ϵ_{im} и ϵ_{om} - излучаемая и доставляемая к объекту энергия излучения на m -такте зондирования, угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций показателя преломления среды

распространения и ошибкам "настройки" параметров схемы ОВ: \vec{r} и z_m на истинные координаты объекта $\vec{\theta}_m$ и z_m , а горизонтальная черта - ансамблю шумов ОКУ. Действительно, с учетом выражений (3) и (4) излучаемая и доставляемая к объекту энергии записываются в виде

$$\epsilon_{Im} = \frac{1}{2} \int_{t_m}^{t_{m+1}} dt \int_{\Omega} |u_m(\vec{r}, t)|^2 d^2 r = \begin{cases} \frac{|u_0|^2}{2} T_{\text{ЭФФ}} S & m = 0 \\ \frac{1}{2} |\mu_m|^2 \int_{t_m}^{t_{m+1}} dt \int_{\Omega} |v_m(\vec{r}, t-\Delta t)|^2 d^2 r, & m = 1, 2, \dots \end{cases}; \quad (6)$$

$$\epsilon_{0m} = S_\sigma (k/2\pi z_m)^2 \int_{t_m}^{t_{m+1}} dt \left[\int_{\Omega} u_m(\vec{r}, t) \exp \left[ik\vec{r}^2/2z_m - ik\vec{\theta}_0 \cdot \vec{r} + \psi_m(z_m, \vec{p}_{0m}; 0, \vec{r}; t_m) \right] d^2 r \right]^2 =$$

$$= \begin{cases} \frac{|u_0|^2}{2} S_\sigma T_{\text{ЭФФ}} (k/2\pi z_m)^2 \left| \int_{\Omega} x_0(\vec{r}, 0) d^2 r \right|^2, & m = 0, \\ \frac{S_\sigma}{2} |\mu_m|^2 (k/2\pi z_m)^2 \int_{t_m}^{t_{m+1}} dt \left| \int_{\Omega} v_m^*(\vec{r}, t-\Delta t - z_m/c) x_m(\vec{r}, t_m) d^2 r \right|^2, & m = 1, 2, \dots \end{cases}$$

В выражениях (6) и (7) приняты следующие обозначения: $T_{\text{ЭФФ}} = \int_0^{t_1} |u(t)|^2 dt$ - эффективная длительность зондирующего импульса, S - площадь проекции объекта на картинную плоскость, t_m - момент излучения сигнала на m -м такте, $\Delta t = t_m - t_{m-1}$ - время, затрачиваемое на обработку, обращение и переизлучение сигнала, $x_m(\vec{r}, t) \approx \exp[-ik\Delta z_m \vec{r}^2/2z_m^2 - ik\Delta \vec{\theta}_m \cdot \vec{r} + \psi_m(z_m, \vec{p}_{0m}; 0, \vec{r}; t)]$.

Подставляя (1) в (4), а (4) в (6) и (7), усредняя полученные выражения и используя (5), для важного на практике случая отсутствия корреляции флуктуаций поля на соседних тактах зондирования (т.е. когда время распространения до объекта и обратно $t_{m+1} - t_m$ существенно превышает интервал корреляции флуктуаций поля τ_k) будем

иметь

$$K_m = K \bar{\mathcal{E}}_m(q_m), \quad (8)$$

где $K = SS_0/\lambda^2 z_m^2$ - коэффициент передачи излучения на точечный объект при распространении излучения в однородной среде в отсутствие ошибок "настройки" параметров схемы ОВФ на истинные координаты объекта, а $\bar{\mathcal{E}}_m(q_m)$ - нормированный коэффициент передачи излучения, являющийся аналогом коэффициента Штреля [5] для систем с фиксированной излучаемой энергией и равный

$$\bar{\mathcal{E}}_m(q_m) = \bar{\mathcal{E}}_m(0)(q_m \bar{\mathcal{E}}_m(\infty) + 1)/(q_m \bar{\mathcal{E}}_m(0) + 1), \quad (9)$$

причем здесь: $q_m = \frac{S}{2N_0 I} \int_{t_m}^{t_{m+1}} \langle |E_m(t)|^2 \rangle dt$ - отношение сигнал/шум

в одной пространственной шумовой моде на m -м такте зондирования, $I = \Delta f T_{\text{стр}}$ - число временных шумовых мод, регистрируемых в приемнике с шириной полосы пропускания Δf за время экспозиции $T_{\text{стр}}$, $\bar{\mathcal{E}}_m(\infty) = R_m^{(2)}(\Delta t)/R_m^{(2)}(0)$ - коэффициент Штреля в отсутствие шумов ОКУ, $\bar{\mathcal{E}}_m(0) = R_m^{(1)}(0)/N$ - коэффициент Штреля в отсутствие полезного сигнала от объекта, $R_m^{(n)}(\Delta t) = \langle P_m^n(\tau_m, t_m) \rangle$ - статистический момент n -го порядка случайной величины $P_m(\tau_m, t_m) = \frac{1}{S} \int_{\Omega} d^2 r_1 \int_{\Omega} d^2 r_2 x_m(\vec{r}_1, \tau_m) x_m^*(\vec{r}_2, t_m) g(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$, $N = SS_0/\lambda^2 I^2$ - число пространственных мод, эффективно обращаемых приемником с полем зрения S_0/I^2 . Как показано в [6], для отношения сигнал/шум q_m справедливо рекуррентное соотношение

$$q_{m+1} = \gamma_m [q_m R_m^{(2)}(\Delta t) + R_m^{(1)}(0)], \quad m = 1, 2, \dots \quad (10)$$

с начальным условием q_1 , определяемым на основе энергетических соотношений (7) при первоначальном "подсвете" объекта, $\gamma_m = (\mu_m)^2 \times K_{\text{ОВФ}} \sigma_{\text{ц}} S (4\pi z_m^4 \Delta_{\text{и}})^{-1}$ - регулярный коэффициент передачи в замкнутом контуре управления через объект наблюдения, $K_{\text{ОВФ}}$ - коэффициент преобразования ОВФ, $\sigma_{\text{ц}}$ - эффективная поверхность рассеяния объекта, $\Delta_{\text{и}}$ - ширина диаграммы направленности зондирующего излучения. Из

выражения (10) следует, что формирование отношения сигнал/шум на каждом такте зондирования происходит не только за счет когерентной составляющей сигнала (первое слагаемое в (10)), но и за счет шума (одна пространственная мода которого попадает на объект при очередном зондировании). Вычисления с использованием формул (8) - (10) требуют, вообще говоря, моделирования случайных величин $P_m(\tau_m, t_m)$ для определения статистических моментов $R_m^{(n)}(\Delta t)$. В случае, когда флуктуации $P_m(\tau_m, t_m)$ невелики, выражения для статистических моментов найдены в [7].

Из выражений (9), (10), в частности, следует, что эффективности алгоритма ОВФ существенно зависит от статистических характеристик ошибок оценивания угловых координат $\Delta\theta_m$ и дальности до объекта Δz_m . Обычно эти ошибки независимы и распределены по нормальному закону с нулевым средним. Тогда легко определить параметры, характеризующие качество "настройки" приемного устройства схемы ОВФ на заданную локационную обстановку. Этими параметрами являются $N_\theta = k^2 \sigma_\theta^2 S$ и $N_z = (kS/2\pi z_m)^2 \sigma_z^2 / z_m^2$, где $\sigma_\theta^2 = \langle |\Delta\theta_m|^2 \rangle$ и $\sigma_z^2 = \langle (\Delta z_m)^2 \rangle$ - дисперсии ошибок оценивания угловых координат и дальности до объекта. Если дисперсии σ_θ^2 и σ_z^2 достаточно велики, так что сумма $N_\theta + N_z$ существенно превышает число эффективно обращаемых мод N , то $R_m^{(1)}(0) \approx N/(N_\theta + N_z) \ll 1$, а следовательно, и $\mathcal{E}_m(\infty) \ll 1$. Качество излучения, доставляемого к объекту, близкое к дифракционному ($\mathcal{E}_m(q_m) \sim 1$), возможно лишь при выполнении противоположного неравенства $(N_\theta + N_z)/N \ll 1$ и достаточно большом энергетическом потенциале схемы $q_m/N \gg 1$. В этой ситуации обычно удовлетворяется и условие $N_\Pi/N \ll 1$, где N_Π - число "пятен когерентности", укладывающихся на приемной апертуре, для волны, отраженной от объекта наблюдения в случайно-неоднородной среде.

Отметим еще одну существенную особенность алгоритма ОВФ, которая позволяет значительно упростить анализ и довести оценки качества до простых аналитических формул. Дело в том, что операция ОВФ, осуществляющаяся, например, на основе эффекта ВР в нелинейной среде, обычно малоинерционна, так что $\Delta t/\tau_k \ll 1$. Кроме того, для всех адаптивных систем характерно использование достаточно больших по размеру приемно-передающих апертур. В результате на практике всегда выполняется условие $S/\lambda L \gg 1$ (L - длина трассы распространения излучения в турбулентной атмосфере). Поэтому амплитудные флуктуации поля, возникающие при распространении, в значительной степени усредняются. Указанные обстоятельства приводят к отсутствию "динамической" (по времени и пространству) составляющей

ошибки компенсации турбулентных искажений. При этом случайная величина $P_m(\tau_m, t_m) \rightarrow 1$, а следовательно, показатель качества алгоритма ОВФ (9), характеризующий в этом случае энергетические потери лишь за счет шумовой составляющей ошибки компенсации, записывается в виде

$$\Theta_m(q_m) \approx (q_m + 1) / (q_m + N), \quad (11)$$

причем если координаты объекта на интервале наблюдения не меняются ($\gamma_m = \gamma$), то

$$q_m = \gamma^{m-1} q_1 + \gamma (\gamma^{m-1} - 1) / (\gamma - 1). \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) иллюстрируются рис. 2 и 3, на которых изображены зависимости показателя эффективности ОВФ Θ_m на различных тактах зондирования от отношения сигнал/шум на первом такте q_1 . При расчетах предполагалось, что параметр N , характеризующий величину поля зрения системы, равен 100. Коэффициент передачи в замкнутом контуре управления γ , определяемый коэффициентом усиления ОКУ μ , на рис. 2 полагался равным его критическому значению $\gamma = 1$, а на рис. 3 $\gamma = 1,5$. Из приведенных зависимостей следует, что для обеспечения высокой эффективности ОВФ за достаточно малое время требуется либо большая энергия первоначального подсвета, либо высокий коэффициент усиления ОКУ. Например, для достижения $\Theta_m \geq 0,8$ при $\gamma = 1$ за десять тактов зондирования ($m = 10$) требуется $q_1 > 300$. Если же коэффициент усиления ОКУ велик ($\gamma = 1,5$), то $\Theta_{10} \geq 0,8$ уже при $q_1 \geq 10$.

Помимо (8) важной характеристикой качества доставляемого к объекту излучения могут служить относительные флуктуации его энергии

$$\delta \varepsilon_{0m} = \overline{\langle \varepsilon_{0m}^2 \rangle} / \overline{\langle \varepsilon_{0m}^2 \rangle} - 1. \quad (13)$$

Подставляя (7) в (13), в тех же приближениях, которые были использованы при получении выражений (11) и (12), будем иметь

$$\delta \varepsilon_{0m} \approx \delta \varepsilon_{00} (Q_m / (Q_m + 1))^2, \quad (14)$$

где величина

$$Q_m = \gamma^{m-1} q_1 (\gamma - 1) / (\gamma^m - 1) \quad (15)$$

представляет собой эффективное значение отношения сигнал/шум при

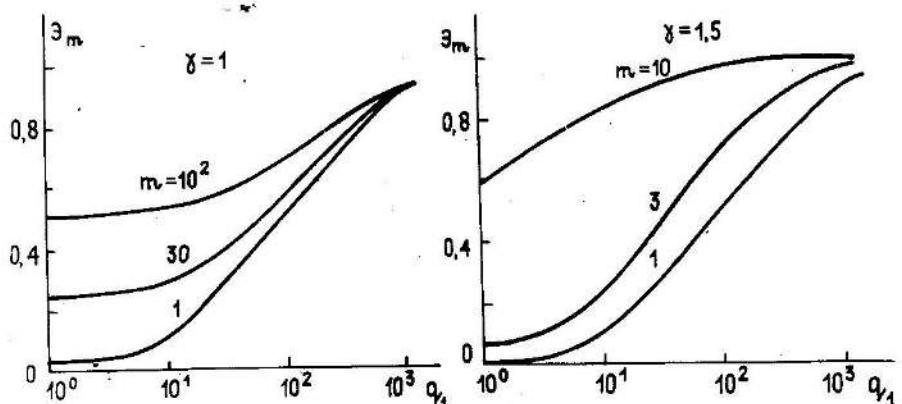


Рис. 2, 3.

Рис. 2. Зависимость показателя эффективности ОВФ \mathcal{E}_m от отношения сигнал/шум на первом такте зондирования q_1 на $m = 1, 30$ и 100 тактах зондирования при $\gamma = 1$.

Рис. 3. Зависимость показателя эффективности ОВФ \mathcal{E}_m от отношения сигнал/шум на первом такте зондирования q_1 на $m = 1, 30$ и 10 тактах зондирования при $\gamma = 1,5$.

определении флюктуационных характеристик излучения. Числитель этого величины $\gamma^{m-1}q_1$ описывает когерентную часть излучения, а знаменатель $(\gamma^m - 1) / (\gamma - 1)$ характеризует увеличение некогерентной (шумовой) составляющей доставляемого к объекту излучения за m такта зондирования.

Как следует из выражений (14) и (15), флюктуации энергии излучения обусловлены лишь его сигнальной составляющей. Этим результатом предположения о широкополосности устройства ОВФ, при котором все флюктуации излучения, обусловленные шумом, достаточно хорошо усредняются. Поэтому при отсутствии постороннего источника "подсвета" ($q_1 = 0$) флюктуации энергии излучения у объекта такие отсутствуют. При этом, однако, согласно выражениям (12) и (11) замедляется темп нарастания энергии на объекте.

Заметим, что существенного улучшения флюктуационных характеристик можно добиться, если "запуск" системы ОВФ осуществляется не от постороннего источника "подсвета", находящегося вблизи излучающей апертуры ОВФ, а от бакена, расположенного в ближайшей окрестности или на самом объекте наблюдения. В этом случае $\delta \varepsilon_{00} = 0$ и в соответствии с (14) $\delta \varepsilon_{0m} = 0$ на любом такте зондирования.

Зависимость среднеквадратичных значений флюктуаций энергии

$(\delta \varepsilon_{0m})^{1/2}$ от числа тактов зондирования m приведена на рис. 4 при различных значениях коэффициента передачи γ и отношения сигнала/шум q_1 . Расчеты проведены в предположении, что на апертуре умещается $N_p = 10$ "пятен когерентности" поля, распространяющегося в турбулентной атмосфере. При этом дисперсия флюктуаций энергии на объекте при его первоначальном облучении $\delta \varepsilon_{00} \approx 1,3$. Из рис. 4 следует, что наиболее быстрое "затухание" флюктуаций в процессе функционирования системы ОВФ происходит при коэффициенте передачи $\gamma = 1$.

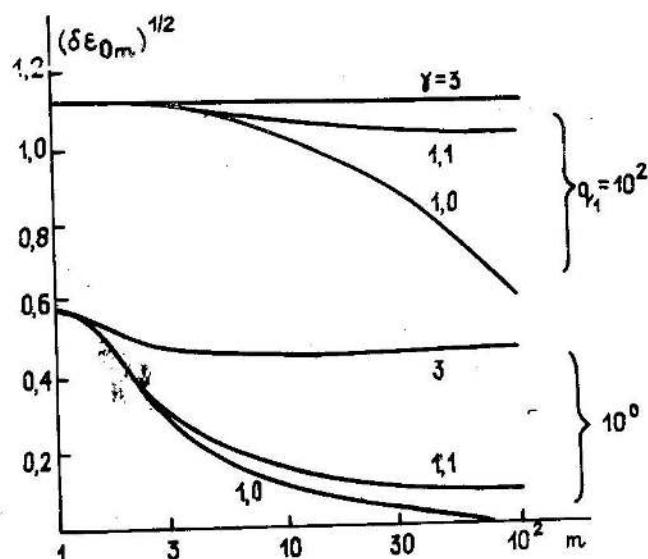


Рис. 4. Зависимость среднеквадратических флюктуаций энергии излучения, доставляемого к объекту, $(\delta \varepsilon_{0m})^{1/2}$ от номера такта зондирования m при $\gamma = 1; 1,1$ и 3 и $q_1 = 1$ и 100 .

До сих пор мы рассматривали "локальные" характеристики качества алгоритма ОВФ. В то же время для многотактового алгоритма определенный интерес представляют и "интегральные" характеристики. Простейшими из них являются: суммарное количество средней энергии, доставляемой за весь интервал наблюдения

$$\langle \overline{\varepsilon_{0\Sigma}} \rangle = \sum_{m=1}^M \langle \overline{\varepsilon_{0m}} \rangle \quad (16)$$

и "интегральный" коэффициент передачи

$$K_{\Sigma} = \langle \overline{\varepsilon_{0\Sigma}} \rangle / \langle \overline{\varepsilon_{i\Sigma}} \rangle, \quad (17)$$

где $\varepsilon_{i\Sigma} = \sum_{m=1}^M \varepsilon_{im}$ - излучаемая энергия на интервале наблюдения, M - количество тактов зондирования, соответствующее этому интервалу.

При выполнении использованных ранее условий ($N \gg N_p$, $\Delta t/\tau_k \ll 1$) с учетом выражений (6) и (7) получим

$$\langle \overline{\varepsilon_{\text{II}\Sigma}} \rangle = R_{\text{q}_1}^{(1)}(0) \langle \varepsilon_{00} \rangle \gamma (\gamma^M - 1) / (\gamma - 1) + |\mu|^2 K_{\text{OBF}} \bar{\varepsilon}_{\text{ш}} \times \quad (18)$$

$$\times [((\gamma^M - 1) / (\gamma - 1) - M) \gamma / (\gamma - 1) - N];$$

$$\langle \overline{\varepsilon_{0\Sigma}} \rangle = \langle \varepsilon_{00} \rangle \gamma (\gamma^M - 1) / (\gamma - 1) + |\mu|^2 K_{\text{OBF}} \bar{\varepsilon}_{\text{ш}} \times \quad (19)$$

$$\times [(\gamma^{M+1} - 1) / (\gamma - 1) - M - 1] / (\gamma - 1).$$

Где $\langle \varepsilon_{00} \rangle$ и $\langle \varepsilon_{00} \rangle$ - средние излучаемая и доставляемая к объекту энергии при его первоначальном ($m = 0$) облучении, $\bar{\varepsilon}_{\text{ш}} = 2N_0e$ - средняя энергия излучения шумов ОКУ в одной пространственной моде.

Подставляя (18) и (19) в (17), получим интегральный показатель эффективности работы алгоритма ОВФ в том же виде, что и для "локального" показателя (11):

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = K_{\Sigma}/K \approx (q_{\text{ср}} + 1) / (q_{\text{ср}} + N), \quad (20)$$

где $q_{\text{ср}} = 1/M \sum_{m=1}^M q_m = 1/M[q_1(\gamma^M - 1) / (\gamma - 1) + ((\gamma^M - 1) / (\gamma - 1) - M) \gamma / (\gamma - 1)]$ - среднее значение отношения сигнал/шум на интервале наблюдения.

Зависимость показателя эффективности \mathcal{E}_m от номера такта зондирования m (выражение (11)) и \mathcal{E}_{Σ} от количества тактов зондирования на интервале наблюдения M (выражение (20)) при $q_1 = 1$ и различных значениях γ представлены на рис. 5. Аналогичные зависимости при $q_1 = 100$ приведены на рис. 6.

Из соотношений (12) и (20) следует, что рост доставляемой к объекту средней энергии в процессе функционирования происходит лишь в случае $\gamma \geq 1$. В критической точке ($\gamma = 1$), очевидно, имеем $q_m = q_1 + m - 1$, $q_{\text{ср}} = q_1 + (M - 1)/2$, т.е. увеличение отношения сигнал/шум при этом обусловлено возрастанием лишь некогерентной (шумовой) составляющей сигнала. В частности, при недостаточно интенсивном первоначальном облучении объекта ($q_1 \leq 1$) оба показателя эффективности (11) и (20) на значительной части интервала наблюдения могут оказаться меньше, чем в системе без адаптации. Действительно, при числе "пятен когерентности" $N_p = 10$ в отсутствие адаптации $\mathcal{E}_0 \approx$

$\approx 0,09$. При этом из рис. 5 видно, что при $\gamma = 1$ от $M = 1$ вплоть до $M = 10$ все еще \mathcal{E}_m и $\mathcal{E}_\Sigma < \mathcal{E}_0$. Если же $\gamma \gg 1$, система легко входит в адаптивный режим и при этом имеет место существенный выигрыш в величине коэффициента передачи. Из рис. 5 и 6 следует, что в случае, когда $q_1 = 1$, такой режим устанавливается при $\gamma \geq 3$, если же $q_1 = 100$, то адаптивный режим имеет место уже при $\gamma \geq 1,1$.

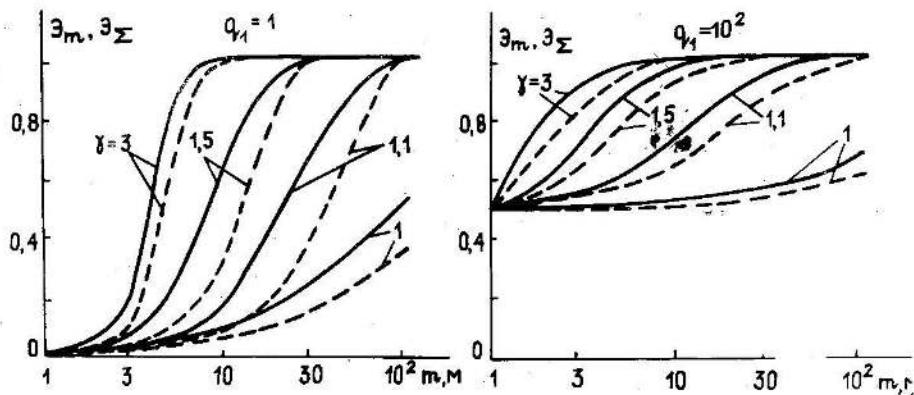


Рис. 5, 6.

Рис. 5. Зависимости "локального" показателя эффективности ОВФ \mathcal{E}_m от номера такта зондирования m и "интегрального" \mathcal{E}_Σ от количества тактов зондирования на интервале наблюдения M при $\gamma = 1; 1,1; 1,5$ и 3 и $q_1 = 1$.

Рис. 6. Зависимость показателей эффективности ОВФ \mathcal{E}_m от m и \mathcal{E}_Σ от M при $\gamma = 1; 1,1; 1,5$ и 3 и $q_1 = 100$.

Таким образом, выражения (9), (11) и (20) позволяют оценить эффективность многотактового алгоритма ОВФ, а формулы (19) и (14) – определить величину средней энергии, доставляемой к объекту, и дисперсию ее флюктуаций в зависимости от основных параметров адаптивной системы: коэффициента передачи ОКУ $|u|^2$ и его шумовых характеристик $\bar{\varepsilon}_w$; энергетического потенциала источника первоначального "подсвета" объекта $\langle \varepsilon_{oo} \rangle$; коэффициента преобразования устройства ОВФ $K_{OBФ}$ поля зрения (характеризуемого параметром N), числа тактов зондирования на интервале наблюдения M ; времени, затрачиваемом на "обработку" сигнала в приемнике. Из результатов настоящей работы также следует, что эффективность ОВФ "зашумленного" сигнала в существенной мере зависит от качества "настройки" схемы на истинные координаты объекта наблюдения. Детальное изучение этого аспекта работы схемы с ОВФ является предметом дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. - М.:Наука, 1985.
2. Беспалов В. И., Пасманик Г. А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. - М.:Наука, 1985.
3. Бакут П. А., Киракосянц В. Е., Логинов В. А. //Изв. вузов. Физика. 1985. N 11. С. 64.
4. Курикша А. А. Квантовая оптика и оптическая локация. - М.: Сов. радио, 1973.
5. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. М.:Наука, 1985.
6. Киракосянц В. Е., Логинов В. А., Слонов В. В. //Квантовая электроника. 1990. Т.17. N 9. С.1202.
7. Киракосянц В. Е., Логинов В. А., Павлов В. С. //Квантовая электроника. 1989. Т. 16. N 2. С.394.

Научно-производственное объединение
"Астрофизика"

Поступила в редакцию
20 мая 1991 г.

OPTICAL RADIATION FOCUSING EFFICIENCY OF MULTICYCLE OPC OPERATION REGIME

V. E. Kirakosyants, V. A. Loginov, V. V. Slonov

Multicycle OPC algorithm efficiency is studied in the problem of laser radiation focusing while propagating through unhomogeneous medium. Both "local" (one-tact) and "integral" (for all measuring period) algorithm efficiency criteria are considered. Criteria depending on the main OPC adaptive system parameters are found. It is shown, that it is necessary to adapt OPC system to real location environment for OPC efficiency increasing of "noise" signal.