

В.П. Лукин, Б.В. Фортес

## Искусственные опорные источники и неизопланарность флуктуаций

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.10.2001 г.

В статье проводятся систематические исследования влияния различия сигнальной и опорной атмосферных трасс на эффективность коррекции фазовых искажений. Рассмотрены примеры адаптивных систем, в которых в качестве опорного используется сигнал, отраженный от объекта или рассеянный неоднородностями атмосферы. Изучаются уровни остаточных искажений при различных временных задержках в адаптивной системе. Расчеты проведены для различных сценариев оптического эксперимента: приземные трассы, высотные (самолетные) горизонтальные трассы. В качестве модели, описывающей изменение скорости ветра по высоте, применена модель Бафтона.

### Введение

Лазерные пучки, формирующиеся в атмосфере, подвержены действию турбулентных флуктуаций, что приводит к искажениям [1, 2]. Для обеспечения коррекции турбулентных искажений оптических пучков применяют адаптивные оптические системы. Сами по себе турбулентные искажения не зависят от скорости объекта или скорости сканирования лазерного пучка, но для движущегося объекта требования к адаптивной оптической системе (прежде всего к полосе частот [3]) будут выше, чем для неподвижного. Адаптивные оптические системы, как правило, используют опорные источники, излучение которых проходит атмосферную трассу навстречу основному излучению.

Ввиду сильной зависимости адаптивных оптических систем от качества используемой информации очень важным является возможность формирования опорного источника в том же оптическом канале, в котором работает сама оптическая система. Однако чаще всего оптический сценарий позволяет сформировать опорный источник для несколько другого оптического канала или направления. Это приводит к проявлению так называемой неизопланарности флуктуаций.

### Основные формулы

Неизопланарность в адаптивных системах, работающих с использованием опорного источника, обусловлена различием аббераций волнового фронта на атмосферных трассах для корректируемого и опорного пучков. Эти различия обусловлены либо разностью хода оптической волны из-за чисто геометрических характеристик (различие трасс или различие расходимости излучения корректируемого и опорного оптических пучков), либо временной задержкой [4–8]. Во многих случаях причины, порождающие эти фак-

торы, похожи, более того, методы их математического представления тоже одинаковы.

Рассмотрим проблему компенсации турбулентных аббераций в приближении фазового экрана, помещенного на трассе на расстоянии  $x$ . Используется аппроксимация дельта-коррелированных турбулентных флуктуаций вдоль направления распространения, из чего следует, что при вычислении флуктуаций необходимо выполнить интегрирование вдоль переменной  $x$ . Предположим, что случайный экран помещен в плоскости  $x$ ;  $\varphi(\mathbf{p}, x, t)$  – это фазовые флуктуации в момент времени  $t$  в точке  $\mathbf{p}$ , где  $\mathbf{p}$  – поперечная координата. Используя гипотезу Тейлора о «замороженной турбулентности», можно параметры фазового экрана в различные моменты времени  $t$ ,  $t + \tau$  связать следующим соотношением:

$$\varphi(\mathbf{p}, x, t + \tau) = \varphi(\mathbf{p} - \mathbf{V}\tau, x, t) = \varphi(\mathbf{p} - \mathbf{V}t - \mathbf{V}\tau, x, 0), \quad (1)$$

где  $\tau$  – временная задержка;  $\mathbf{V}$  – вектор скорости ветра. Из выражения (1) как раз и следует подобие математического описания углового неизопланатизма и неизопланатизма, который обусловлен временной задержкой.

Оптический сценарий эксперимента будет характеризоваться: координатами цели и опорного источника – бакена. Будем использовать здесь угловые координаты цели  $\theta_T$  и бакена  $\theta_G$ , представляющие собой отношение линейных координат и расстояния между плоскостью наблюдения и плоскостью, в которой находится цель (или опорный источник – бакен). Угловые координаты бакена и направление оптической оси системы будем описывать через переменные  $\theta_G(t)$  и  $\theta_A(t)$ . Угловая координата  $\theta_T(t)$  для реального объекта (цели), находящегося на расстоянии  $L$  и движущегося со скоростью  $v = M \cdot 330$  м/с в поперечном направлении, меняется как

$$\theta_T(t) = vt/L = \omega t, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота движения объекта;  $M$  – число Маха. Если бакен формируется отражением от самого объекта непосредственно, то угловая переменная  $\theta_6(t) = \theta_T(t)$ . Если имеет место некий произвольный сдвиг объекта, ввиду конечности скорости распространения света  $c$  и наличия временной задержки в цепи адаптивной системы  $\tau_d$ , тогда рэлеевский бакен для обеспечения коррекции флуктуаций системы должен формироваться с опережением, т.е. он должен формироваться в той точке пространства, где появится в момент времени  $t + \tau_d$  объект. Тогда

$$\begin{aligned}\theta_6(t) &= \theta_T(t) + 2v\tau_c/L + v\tau_d/L = \\ &= \theta_T(t) + 2v/c + v\tau_d/L, \quad \tau_c = L/c.\end{aligned}\quad (3)$$

В общем случае

$$\theta_6(t) = \theta_T(t) + \eta (2v/c + v\tau_d/L), \quad (4)$$

где  $\eta$  – параметр опережения бакена;  $\eta > 0$ , когда бакен опережает движение объекта, если же  $\eta = 0$ , то бакен не опережает цель.

При выборе направления оси адаптивной оптической системы задержка, связанная с конечностью скорости света, должна быть также принята во внимание. Таким образом:

$$\theta_A(t) = \theta_T(t) + v\tau_c/L = \theta_T(t) + v/c. \quad (5)$$

В результате опорная волна, излученная в момент времени  $t$ , пересекая фазовый экран, приобретает абберации, описываемые функцией

$$\begin{aligned}\varphi_6(\mathbf{p}) &= \varphi[\mathbf{p} + \theta_6(t)x, t + (L - x)/c] = \\ &= \varphi[\mathbf{p} + \theta_6(t)x - (L - x)V/c, t].\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь предполагаем, что время распространения опорной волны до фазового экрана равно  $(L - x)/c$ .

## Рэлеевский бакен

В момент времени  $t + L/c$  опорная волна достигнет апертуры адаптивной оптической системы, а в момент времени  $t + L/c + \tau_d$  корректирующая поверхность будет сформирована с использованием информации, принесенной этой опорной волной.

Управляемый лазерный пучок приходит к фазовому экрану в момент времени  $t + L/c + \tau_d + x/c$  и приобретает следующие абберации:

$$\begin{aligned}\varphi_A(\mathbf{p}) &= \varphi[\mathbf{p} + \theta_A(t + L/c + \tau_d)x, t + L/c + \tau_d + x/c] = \\ &= \varphi[\mathbf{p} + \theta_A(t + L/c + \tau_d)x - V(L/c + \tau_d + x/c), t].\end{aligned}\quad (7)$$

Из сравнения выражений (6) и (7) видно, что остаточную ошибку коррекции обуславливает относительный сдвиг фазового экрана. Этот сдвиг равен

$$\Delta = [\theta_A(t + L/c + \tau_d) - \theta_6(t)] x - V(\tau_d + 2x/c). \quad (8)$$

Подставляя его в формулу (5), получаем

$$\Delta = [v/L(t + \tau_d) + 2v/c - \theta_6(t)] x - V(\tau_d + 2x/c) \quad (9)$$

и, используя выражение (4), находим

$$\Delta = v(\tau_d x/L + 2x/c) (1 - \eta) - V(\tau_d + 2x/c). \quad (10)$$

Когда  $\tau_d = 0$ , формула (10) становится более простой, а именно

$$\Delta = 2x/c (v(1 - \eta) - V). \quad (11)$$

Нужно отметить, что этот относительный сдвиг  $\Delta$  может быть сведен к нулю соответствующим выбором параметра  $\eta$ :

$$\Delta = 0, \quad \text{для } \eta = \eta_0 = 1 - V/v. \quad (12)$$

Если скорость ветра оказывается равной скорости объекта, т.е.  $V = v$ , то оптимальная величина параметра  $\eta$  равна нулю, т.е. бакен, формирующийся отраженным сигналом от самого объекта, является оптимальным.

Когда  $v \gg V$ , то оптимальная величина  $\eta$  приближается к единице, т.е. именно упреждающий рэлеевский бакен является оптимальным. В случае, когда объект движется в направлении, противоположном направлению скорости ветра, оптимальная величина  $\eta_0$  становится больше, чем единица.

Для существенной временной задержки  $\tau_d$  сдвиг  $\Delta$  может быть сведен к нулю, если выбрать

$$\eta_0 = 1 - \frac{V}{v} \frac{\tau_d + 2x/c}{\tau_d x/L + 2x/c}. \quad (13)$$

В случае, когда турбулентность концентрируется вблизи объекта, т.е. когда  $x = L$ , получаем

$$\eta_0 = 1 - V/v. \quad (14)$$

В этой ситуации оптимальная величина параметра  $\eta$  не зависит от временной задержки. В противоположной ситуации, когда значение координаты  $x$  приближается к нулю, получаем

$$\eta_0 \approx 1 - \frac{V}{v} \frac{1}{x} \frac{\tau_d}{\tau_d/L + 2/c}, \quad x \ll \frac{\tau_d c}{2}, \quad (15)$$

или

$$\eta_0 \approx 1 - \frac{L/v}{x/V}, \quad \tau_d \gg 2L/c = 2\tau_c. \quad (16)$$

В области, прилежащей к апертуре (координаты  $x$  малы), можно отбросить единицу в последнем выражении, тогда получим

$$\eta_0 \approx -\frac{L/v}{x/V}, \quad (17)$$

т.е. если скорость ветра и скорость объекта имеют одинаковое направление, то параметр упреждения стремится к отрицательной бесконечности, а когда объект движется в сторону, противоположную направлению ветра, то к положительной.

В общем случае турбулентность распределена по всей трассе, и тогда нужно рассматривать последовательность фазовых экранов. Более того, возможна зависимость скорости ветра от координаты  $x$ , а это означает, что фазовые экраны должны двигаться с различной скоростью [9].

## Пространственная фильтрующая функция

В общем случае оптимизировать упреждающим перенацеливанием бакена достаточно трудно. Более того, в большинстве реальных ситуаций интенсивность рэлеевского бакена слишком мала, чтобы обеспечить фазовую коррекцию. Однако в некоторых ситуациях упреждающее перенацеливание бакена дает свои преимущества.

Чтобы оценить эффективность коррекции, необходимо рассчитать дисперсию остаточных флуктуаций. Эта дисперсия представляет собой интеграл по трассе от некоторой функции, зависящей от интенсивности турбулентности  $C_n^2(x)$  по трассе и от величины сдвига  $\Delta(x)$ .

Требуемое уравнение может быть получено из известной формулы, описывающей угловой неизотропизм, поскольку в обоих случаях источник остаточных ошибок один и тот же. Для углового неизотропизма дисперсия остаточных фазовых ошибок дается [8] следующей формулой:

$$\sigma_{\phi}^2 = (\theta/\theta_0)^{5/3} = \theta^{5/3} 2,91k^2 \int_0^L C_n^2(x)x^{5/3} dx. \quad (18)$$

Поскольку произведение  $\theta$  и  $x$  есть относительный сдвиг траекторий опорного и основного пучков, то можно получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta\phi}^2 &= 2,91k^2 \int_0^L C_n^2(x)(\theta x)^{5/3} dx = \\ &= 2,91k^2 \int_0^L C_n^2(x)\Delta^{5/3}(x) dx. \end{aligned} \quad (19)$$

Заметим, что для фазового экрана, т.е. для тонкого турбулентного слоя, характеризующегося когерентной длиной

$$r_0^{-5/3} = 0,423k^2 C_n^2(x) \delta x, \quad (20)$$

выражение для дисперсии имеет следующий вид:

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = 6,88(\Delta/r_0)^{5/3}. \quad (21)$$

Это выражение совпадает со структурной функцией фазы, записанной для координаты разности  $\Delta$ . Дисперсия остаточной ошибки, рассчитываемая с помощью этой формулы, учитывает компоненту флуктуаций фазы, определяемую как постоянное запаздывание (поршень). А поскольку эта компонента не оказывает влияния на эффективность коррекции, то данная эффективность будет переоценена.

Точность выражения (19) увеличивается, когда отношение  $\Delta/D$  (здесь  $D$  – диаметр апертуры) уменьшается. Выражение для дисперсии флуктуаций фазы без постоянной компоненты флуктуаций поля представлено в [4, 10, 11]. С помощью обозначений, используемых в настоящей статье, это выражение можно переписать в следующей форме:

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = 2,91k^2 \int_0^L C_n^2(x)D(x)^{5/3} f[\Delta(x)/D(x)] dx, \quad (22)$$

где

$$f(\alpha) = 0,896 \int_0^{\infty} u^{-8/3} du [1 - J_0(2\alpha u)] \left( 1 - 4 \frac{J_1^2(u)}{u^2} \right) \quad (23)$$

– пространственная фильтрующая функция [9], а функция  $D(x)$  представляет собой проекцию диаметра апертуры системы на плоскость  $x$ .

Необходимо также принимать во внимание, что опорный пучок – расходящийся, а прямой (основной) пучок – сфокусированный. Для пучков с большими диаметрами и малых бакенов можно использовать выражения для сферической волны, а именно

$$D(x) = D(1 - x/L). \quad (24)$$

Для малых величин аргумента фильтрующая функция

$$f(\alpha) = \alpha^{5/3} \quad (25)$$

и выражение (22) трансформируется в выражение (19). Для больших величин аргумента фильтрующая функция достигает насыщения и результирующая величина дисперсии ошибки фазовой коррекции достигает уровня в два раза выше, чем тот, что достигается системой без коррекции, т.е.

$$\sigma_{\Delta\phi}^2(\Delta/D \rightarrow \infty) = 2 \cdot 1,03(D/r_0)^{5/3}. \quad (26)$$

Функция  $f(\alpha)$  представлена на рис. 1. Точками обозначены величины, полученные численным интегрированием. Сплошная линия – результат аппроксимации

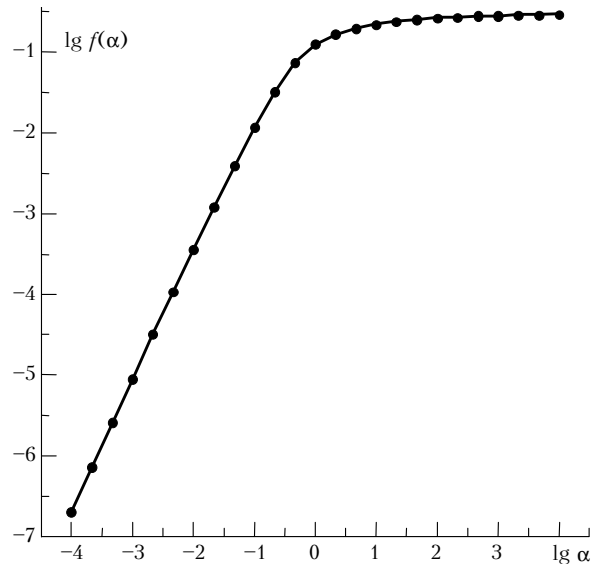


Рис. 1. Пространственная фильтрующая функция  $f(\alpha)$

данных расчета полиномом девятой степени. Аппроксимация была выполнена в логарифмических координатах, т.е.

$$\lg f(\alpha) = \sum_{n=0}^9 a_n (\lg \alpha)^n. \quad (27)$$

Коэффициенты аппроксимации представлены ниже:

а) если  $-4 < \lg \alpha < 0$ , то

|             |             |               |              |               |
|-------------|-------------|---------------|--------------|---------------|
| $n = 0$     | $n = 1$     | $n = 2$       | $n = 3$      | $n = 4$       |
| -0,90300263 | +0,54630991 | -0,0075005029 | +1,9852349   | +3,0232371    |
| $n = 5$     | $n = 6$     | $n = 7$       | $n = 8$      | $n = 9$       |
| +2,2959981  | +1,0072076  | +0,25730477   | +0,035491319 | +0,0020411442 |

б) если  $0 < \lg \alpha < 4$ , то

|              |              |               |             |               |
|--------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
| $n = 0$      | $n = 1$      | $n = 2$       | $n = 3$     | $n = 4$       |
| -0,90300481  | +0,46973638  | 0,41229668    | +0,29897322 | -0,15200895   |
| $n = 5$      | $n = 6$      | $n = 7$       | $n = 8$     | $n = 9$       |
| +0,042862686 | 0,0024713447 | -0,0020118738 | +5,33356E-4 | -4,1574399E-5 |

Используя аппроксимацию (27), можно рассчитать дисперсию ошибки коррекции для различных трасс.

При коррекции с использованием отраженного сигнала рассмотрим влияние временного запаздывания [10], обусловленного конечностью скорости распространения света, т.е. когда  $\eta = 0$  и  $\tau_d = 0$ . При увеличении скорости объекта остаточная ошибка коррекции увеличивается, поэтому существует ограничение предельной скорости объекта, соответствующей данному уровню остаточной ошибки. Предположим, что остаточная ошибка равна 10% от ее уровня при отсутствии коррекции, т.е.

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 < \frac{1}{10} \sigma_{\phi}^2 = 0,1 \cdot 1,03(D/r_0)^{5/3}. \quad (28)$$

Величины максимальной скорости объекта, рассчитанные для этого уровня остаточной ошибки, представлены на рис. 2 и 3. Все расчеты были выполнены при постоянной скорости ветра 10 м/с. Направления движения объекта и скорости ветра совпадали. Следовательно, максимальная скорость объекта, как правило, не превышает скорость звука. Для трасс с отрицательным углом наклона к горизонту (это может быть только на приподнятых трассах) эта величина не больше, чем половина от скорости звука. Заметим, что по условию (28) высокая эффективность коррекции может быть достигнута только для малых величин отношений  $D/r_0$ . Например, для  $0,103(D/r_0)^{5/3} < 1$  получаем условие  $(D/r_0) < 3,9$ .

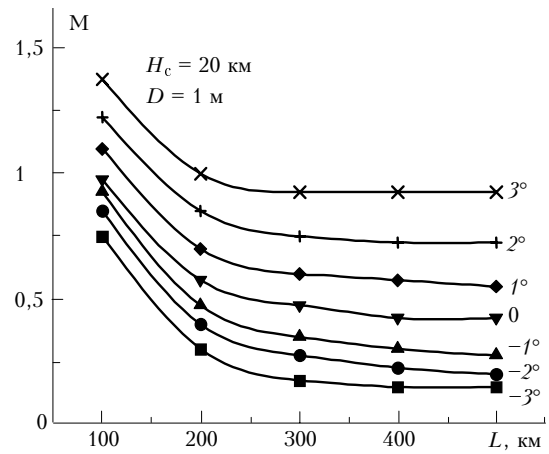
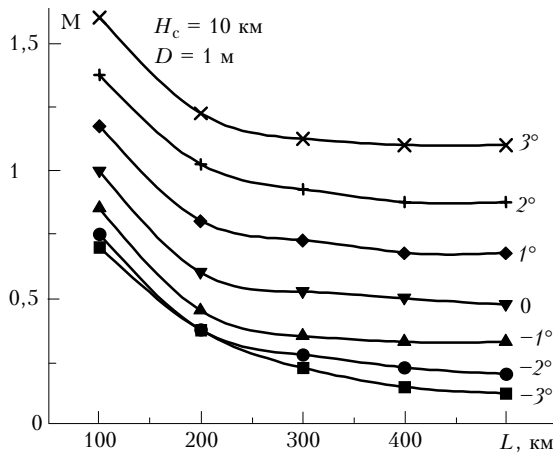


Рис. 2. Максимальная скорость объекта (измеренная в числах Маха) на высотных атмосферных трассах в условиях адаптивной коррекции с использованием отраженного сигнала в качестве опорного. Скорость ветра 10 м/с, остаточная ошибка 10%. Временная задержка в системе отсутствует. 0 – горизонтальное распространение излучения;  $-1^\circ, -2^\circ, -3^\circ$  – направление трасс в нижнюю полусферу;  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  – в верхнюю полусферу

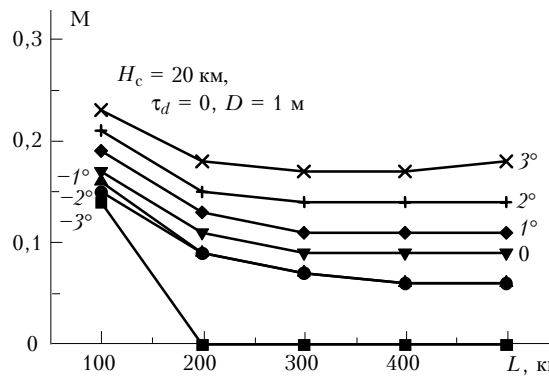
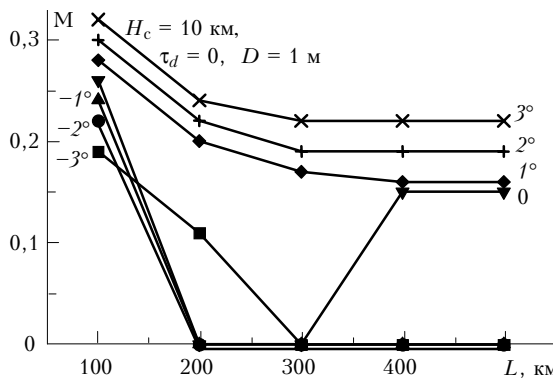


Рис. 3. Максимальная скорость объекта на высотных атмосферных трассах при адаптивной коррекции с использованием отраженного сигнала. Расчет выполнен с помощью модели Бафтона для скорости ветра  $V_g = 5$  м/с, остаточная ошибка 1%. 0 – горизонтальное распространение излучения;  $-1^\circ, -2^\circ, -3^\circ$  – направление трасс в нижнюю полусферу;  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  – в верхнюю полусферу

## Применение модели Бафтона

Подобные результаты получаются при использовании модели Бафтона [3] вертикального распределения скорости ветра, результаты представлены на рис. 4 и 5. Как известно, модель Бафтона описывается следующей формулой:

$$V(h) = V_3 + 30 \exp \left[ - \left( \frac{h - 9400}{4800} \right)^2 \right], \quad (29)$$

где  $V_3$  – параметр модели, соответствующий величине скорости ветра на поверхности Земли;  $h$  – текущая высота над Землей, м. Предполагалось при расчетах, что  $V_3 = 5$  м/с.

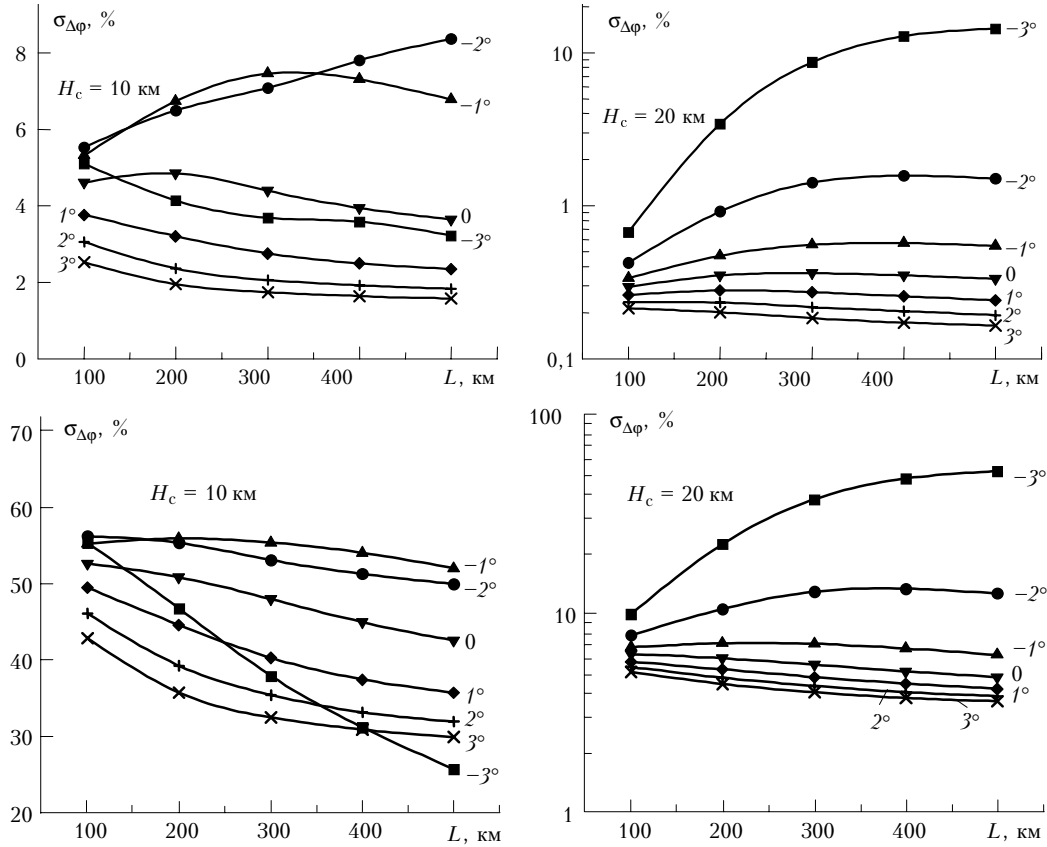


Рис. 4. Нормированная остаточная фазовая ошибка коррекции с использованием рэлеевского бакена. Временная задержка в системе составляла 1 мс (верхняя строка) и 10 мс (нижняя строка). Ветер Бафтона  $V_g = 5$  м/с;  $D = 1$  м. 0 – горизонтальное распространение;  $-1^\circ, -2^\circ, -3^\circ$  – направление трасс в нижнюю полусферу;  $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  – в верхнюю полусферу

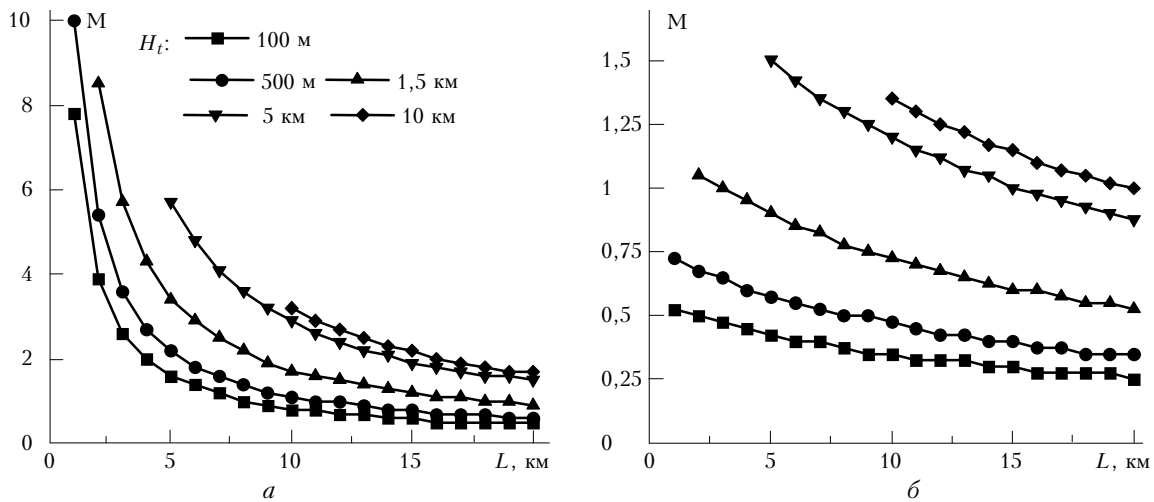


Рис. 5. Максимально допустимая скорость объекта (в числах Маха) на коротких атмосферных трассах для адаптивной системы, работающей по отраженному сигналу. Остаточная ошибка – 1%. Временная задержка системы составляла  $\tau_d = 0$  (а) и  $\tau_d = 1$  мс (б).  $H_t$  – высота цели;  $H_c = 5$  м; ветер Бафтона  $V_g = 5$  м/с;  $D = 0,5$  м

При этом более строгое условие

$$\sigma_{\Delta\varphi}^2 < \frac{1}{100} \sigma_{\varphi}^2 = 0,0103(D/r_0)^{5/3} \quad (30)$$

является свехпереоценивающим для остаточной фазовой ошибки. Как видно, для некоторых трасс ошибка коррекции превышает этот предел даже при нулевой скорости объекта. При наиболее благоприятных условиях максимальная скорость объекта должна быть не выше 50–100 м/с. Когда направления скорости объекта и скорости ветра противоположные, тогда подобное ограничение становится даже более строгим.

Из данных, представленных выше, следует, что возможности коррекции с использованием отраженного от самого объекта сигнала ограничены.

Рассмотрим коррекцию с использованием рэлеевского бакена. В этом случае возможно минимизировать ошибку коррекции выбором параметра перенацеливания  $\eta$ . Поскольку для нас наиболее важен случай, когда скорость объекта много больше, чем скорость ветра, оптимальная величина параметра перенацеливания  $\eta$  близка к единице. Из выражения (10) следует, что ошибка коррекции полностью определена распределением скорости ветра и величиной временной задержки  $\tau_d$  и не зависит от скорости объекта.

В качестве примера рассмотрим результат (см. рис. 4), который получен с использованием рэлеевского бакена. Графики показывают дисперсии остаточных фазовых aberrаций, нормированные на дисперсию этих же флуктуаций в отсутствие коррекции. Временная задержка адаптивной системы равна 1 и 10 мс.

Расчеты показывают [9], что нулевая временная задержка соответствует максимальной эффективности адаптивной системы, работающей с применением рэлеевского бакена, а также для системы, использующей отраженный сигнал, когда скорость объекта равняется нулю. Видно, что даже для наибольших трасс относительная ошибка фазовой коррекции не больше 1%. Так, для модели скорости ветра Бафтона остаточная ошибка оказывается почти на порядок меньше, если оптическую систему разместить на высоте 20 км. В модели Бафтона, как известно, максимальная скорость ветра (35 м/с) имеет место на высоте 10 км.

При увеличении временной задержки до 1 мс получается величина остаточной фазовой ошибки, равная нескольким процентам, для временной задержки 10 мс ошибка увеличивается до 30–60% при высоте размещения системы  $H_c = 10$  км и до 5–10% – при высоте  $H_c = 20$  км. Таким образом, получается, что для достаточно высокой коррекции необходимо уменьшить временную задержку до 1 мс, а для эффективного действия на всем интервале рассматриваемых трасс задержка должна быть не более 0,1 мс.

Подобные расчеты были сделаны и для приземных атмосферных трасс. Результаты, соответствующие коррекции с ошибкой меньше чем 1%, представлены на рис. 5, откуда получаем величину максимально допустимой скорости объекта при нулевой временной задержке адаптивной системы. Максимальная ско-

рость объекта будет меньше чем 2–3 М примерно в половине из рассматриваемых случаев. Когда временная задержка порядка 0,1 мс, максимальная скорость объекта находится в интервале 0,5–1,5 М. Таким образом, на этих трассах применение бакена на основе отражения опять приводит к строгим условиям на скорость объекта и на скорость адаптивного управления.

Взяв параметр упреждения равным единице, рассмотрим управление на основе рэлеевского бакена. Для бакена подобного типа остаточные искажения не зависят от скорости объекта и полностью определяются распределением скорости ветра и временной задержкой адаптивной системы. Вычисленные результаты, нормированные на остаточную ошибку при задержке 1 мс, представлены на рис. 6. Во всем интервале получаем остаточную ошибку меньше чем 1%, и эта ошибка почти не зависит от длины трассы.

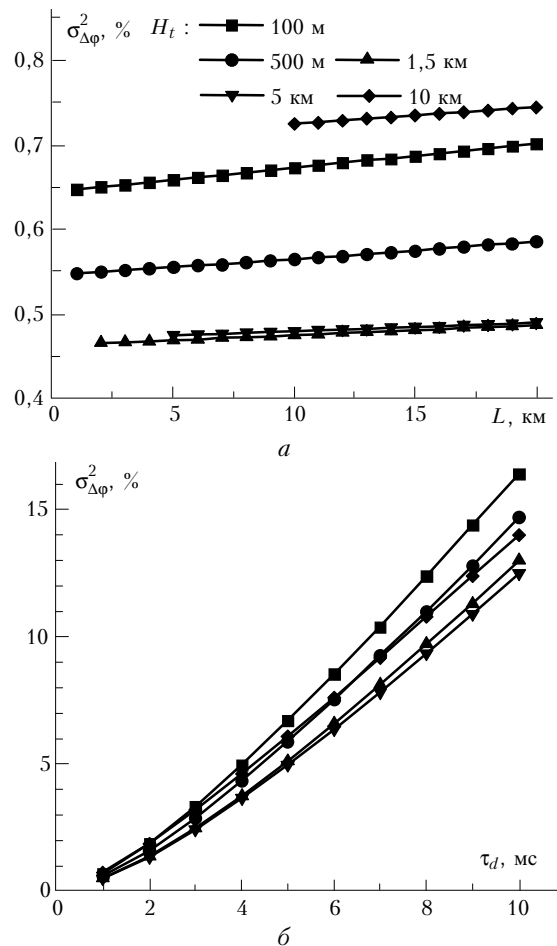


Рис. 6. Остаточные искажения как функция длины трассы для временной задержки 1 мс (а) и остаточные искажения как функция временной задержки в цепи обратной связи (б) адаптивной системы для различных начальных высот передатчика. В обоих случаях в качестве опорного источника использован рэлеевский бакен.  $H_c = 5$  м; ветер Бафтона  $V_g = 5$  м/с;  $D = 0,5$  м

Чтобы изучить зависимость остаточной ошибки от временной задержки, рассмотрим трассу длиной 10 км (рис. 6, б). Из рис. 6, б видно, что рост временной

задержки до 10 мс увеличивает остаточную ошибку почти до 15%, поэтому максимально возможная задержка в адаптивной системе может составлять 1–2 мс.

### Выводы

Применение сигнала, как отраженного от объекта, так и рассеянного от неоднородностей атмосферы (рэлеевского), в качестве опорного бакена делает возможным создание реалистичной адаптивной оптической системы. Причем такая система может быть создана для работы и на низких атмосферных, и на приподнятых (самолетных) трассах. Достаточно высокий уровень коррекции, т.е. малое значение остаточных фазовых искажений, обусловленных неизопланарностью, ввиду несовпадения корректируемых и опорных сигналов, можно обеспечить только для достаточно быстродействующей адаптивной системы, у которой предельная общая временная задержка не будет превышать 1–2 мс.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 01-02-17389.

#### *V.P. Lukin and B.V. Fortes. Artificial reference sources and anisoplanatism of fluctuations.*

The results of systematic studies of the influence of inhomogeneities along signal and reference atmospheric paths on the efficiency of correction of phase distortions are presented. The adaptive systems are treated operating with signals, reflected from an object or scattered by atmospheric inhomogeneities, as the reference ones. Levels of residual distortions at various time lags in an adaptive system are under study. Calculations are performed for different scenarios of the optical experiment: ground paths and high-altitude (aircraft) horizontal paths. To describe the wind speed altitude variations, the Bufton model is used.

1. *Tatarskiy B.I.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
2. *Ishimaru A.* Wave Propagation and Scattering in Random Media. V. 2. New York; San Francisco; London: Academic Press, 1978. 346 p.
3. *Greenwood D.P.* Bandwidth specification for adaptive optics systems // J. Opt. Soc. Amer. 1977. V. 67. № 3. P. 390–393.
4. *Noll R.J.* Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Amer. 1976. V. 66. № 3. P. 207–211.
5. *Fried D.L.* Statistics of geometric representation of wavefront distortion // J. Opt. Soc. Amer. 1965. V. 55. № 11. P. 1426–1435.
6. *Fried D.L.* Limiting resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures // J. Opt. Soc. Amer. 1966. V. 56. № 10. P. 1372–1379.
7. *Fried D.L., Vaughn J.L.* Branch cuts in the phase function // Appl. Opt. 1992. V. 31. № 15. P. 2865–2882.
8. *Fried D.L.* Anisoplanatism in adaptive optics // J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. № 1. P. 52–61.
9. *Lukin V.P., Fortes B.V.* Anisoplanatic degradation of correction with real beacon // Proc. SPIE. 2000. V. 4338. P. 107–117.
10. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 286 с.
11. *Stone J., Hu P.H., Mills S.P. and Ma S.* // J. Opt. Soc. Amer. A. 1994. V. 11. № 1. P. 347–357.