

УДК 550.388.2; 554.510.535

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШЭКА — ГАРТМАНА

Л. В. Антошкин, В. В. Лавринов, Л. Н. Лавринова

*Учреждение Российской академии наук
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения РАН,
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
E-mail: lnl@iao.ru*

Распространение лазерного излучения через атмосферу сопровождается изменением светового поля под влиянием турбулентности и представляет собой случайный процесс. Адаптивная система, включающая в себя датчик волнового фронта Шэка — Гартмана и гибкое зеркало, обеспечивает коррекцию искажений, которые были определены в предыдущий момент времени, но к моменту исправления их системой изменяются. Анализ турбулентности в течение заданного времени позволяет сделать прогноз о турбулентных искажениях в последующий момент времени и использовать его, внося поправку в распределение фазы излучения. Улучшение качества адаптивной коррекции может быть достигнуто также за счёт подготовки отражающей поверхности адаптивного зеркала на основе прогноза состояния волнового фронта в следующий момент времени по параметрам турбулентности и поперечной составляющей скорости ветра, определённых из предыдущих измерений датчика Шэка — Гартмана.

Ключевые слова: прогноз, координаты центроида, время «замороженности» турбулентности, поперечная составляющая скорости ветра, случайный фазовый экран, дифференциальный метод, датчик волнового фронта.

Введение. Предназначенная для коррекции турбулентных искажений лазерного излучения адаптивная оптическая система представляет собой динамическую систему со временем срабатывания τ_a [1], которое складывается из времени обработки информации, полученной видеокамерой, времени вычисления управляющих воздействий на адаптивное зеркало [2], времени отработки зеркала, включающего инерционность и переходные процессы механической конструкции данного зеркала. Таким образом, корректирующая поверхность адаптивного зеркала формируется из поверхности волнового фронта, присутствующего на входной апертуре адаптивной системы, заведомо с опозданием на величину τ_a , определяющую как временную задержку системы, так и необходимую долгосрочность прогноза.

Качество коррекции турбулентных искажений оптического излучения в плоскости наблюдения в реальном времени посредством адаптивных систем с постоянным запаздыванием [1] можно повысить, если корректировать фазовое распределение, прогнозируемое в момент времени $t + \tau$ на основе данных оптических измерений, полученных в момент времени t . Причём необходимым условием осуществления прогноза является то, что и время срабатывания τ_a , и длительность прогноза τ должны быть много меньше времени ветрового переноса модели «замороженной» турбулентности через оптический пучок τ_0 [1], т. е. $\tau \ll \tau_0$. Постоянная времени замороженной турбулентности выражается соотношением [3]

$$\tau_0 = 0,31r_0/V_x, \quad (1)$$

где r_0 — радиус Фрида, V_x — поперечная составляющая скорости ветра. В случае адап-

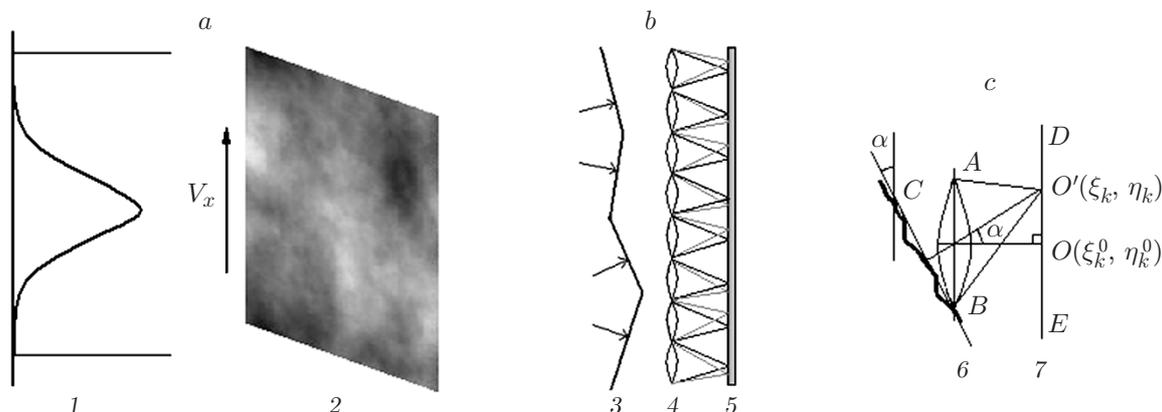


Рис. 1. Схема численных экспериментов: *a* — гауссов пучок 1 и турбулентный экран 2; *b* — схематическое изображение датчика Шэка — Гартмана, состоящего из линзового растра 4 и фотоприёмного устройства 5, 3 — измеряемый волновой фронт; *c* — преломление оптического излучения одиночной линзой 6, 7 — плоскость субапертуры

тивной коррекции излучения речь идёт о прогнозе, выполняемом на короткие интервалы времени, поэтому правильнее говорить об опережающей коррекции.

Смысл опережающей коррекции состоит в том, чтобы задать профиль рабочего зеркала, соответствующий волновому фронту на входной апертуре адаптивной системы в настоящий момент времени по прошлому измерению. Таким образом, задача заключается в создании алгоритма опережающего формирования поверхности адаптивного зеркала на основе измерений датчика Шэка — Гартмана с учётом временных характеристик всех элементов адаптивной оптической системы. Для осуществления опережающей коррекции на гибкое зеркало подаётся сигнал управления, рассчитанный так, чтобы в момент окончания переходных процессов на зеркале сформировалась поверхность, соответствующая волновому фронту, который приходит на входную апертуру системы именно в данный момент времени. Это позволяет при недостаточно высоком быстродействии отдельных элементов адаптивной системы, значительно превышающем 10^{-2} – 10^{-3} с [4], достигнуть минимальной погрешности, что имеет особое значение для приборов, действия которых синхронизируются с работой системы: мощные лазеры, видеокамеры и т. д. В результате волновой фронт формируется с опережением согласно изменениям его поверхности, определяемым турбулентностью атмосферы и его поперечным ветровым переносом.

Для реализации опережающей адаптивной коррекции далее рассмотрим два подхода, протестированные на основе численных экспериментов.

Описание численного эксперимента. В адаптивных оптических системах для регистрации волнового фронта в целях последующего управления адаптивным зеркалом широко применяется датчик волнового фронта Шэка — Гартмана (рис. 1). Такой датчик состоит из линзового растра и высокоразрешающей видеокамеры, установленной в плоскости регистрации изображения. Приходящий на входную апертуру датчика волновой фронт делится растром на конечное число субапертур. На каждой субапертуре наклон волнового фронта оценивается по смещениям энергетических центров тяжести фокальных пятен (центроидов), координаты которых вычисляются по формулам [5]

$$\xi_k = \sum_{i=1}^{n_i} i I_i / \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}; \quad \eta_k = \sum_{j=1}^{n_j} j I_j / \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}; \quad I_i = \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}; \quad I_j = \sum_{i=1}^{n_i} I_{ij}, \quad (2)$$

где I_{ij} — измеренное значение интенсивности сигнала элемента с координатами i, j ; $i = 1, 2, \dots, n_i$; $j = 1, 2, \dots, n_j$; n_i, n_j — размеры субапертур; k — номер субапертуры в плоскости гартманограммы. Координаты центроидов ξ_k, η_k определяются по изображению от видеокамеры относительно центров субапертур.

По величине смещения центроида вычисляется локальный наклон волнового фронта. Исходный волновой фронт реконструируется «сшивкой» его участков по вычисленным локальным наклонам. По этим же наклонам определяются и управляющие воздействия на корректирующее зеркало.

В основе численного эксперимента лежит решение параболического уравнения квазиоптики, которое представляет собой распространение через турбулентную атмосферу светового поля с комплексной амплитудой $E = E(\boldsymbol{\rho}, z, t)$ [6]:

$$2i\kappa(\partial E/\partial z) = \Delta_{\perp} E + 2\kappa^2 \tilde{n}(x, y)E. \quad (3)$$

Здесь $\tilde{n}(x, y)$ — случайное поле флуктуаций показателя преломления, связанное с турбулентной атмосферой; $\kappa = 2\pi/\lambda$ — волновое число (λ — длина волны); $\boldsymbol{\rho} = |\boldsymbol{\rho}|$, $\boldsymbol{\rho} = (x, y)$ — координаты в поперечном сечении светового поля; $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — оператор Лапласа.

Турбулентный или случайный фазовый экран моделировался спектром фон Кармана [6]:

$$\Phi_n(\boldsymbol{x}) = 0,489r_0^{-5/3}(\boldsymbol{x}_0^2 + \boldsymbol{x}^2)^{-11/6} \exp(-\boldsymbol{x}^2/\boldsymbol{x}_m^2), \quad (4)$$

где $\boldsymbol{x}_0 = 2\pi/L_0$, $\boldsymbol{x}_m = 5,92/l_0$ (L_0, l_0 — внешний и внутренний масштабы неоднородностей). Интенсивность фазовых флуктуаций характеризуется радиусом Фрида

$$r_0 = \left(0,423\kappa^2 \int_0^L C_n^2(l)dl\right)^{-3/5},$$

где C_n^2 — структурная постоянная флуктуаций показателя преломления; $L = 0,5\kappa a_0^2$ — длина трассы (a_0 — радиус входной апертуры светового поля). В экспериментах $a_0 = 10$ см, $\lambda = 0,63$ мкм, $r_0 = 5$ см, $L_0 = 10$ м, $l_0 = 1$ мм.

Модель турбулентности, движущаяся в поперечном направлении со скоростью ветра, согласно гипотезе о замороженности турбулентности представляет совокупность коррелированных случайных фазовых экранов, каждый из которых, начиная со второго, является результатом смещения в поперечном направлении первого экрана (4).

Сценарий численных экспериментов следующий: гауссов пучок проходил через турбулентный экран, размещённый на входной апертуре датчика (рис. 1, а). Затем пучок линзовым растром делился на отдельные пучки, которые фокусировались в плоскости наблюдения (рис. 1, б). Далее определялись координаты центроидов (рис. 1, в). В эксперименте расчёты проводились на сетке, содержащей 512×512 пикселей. Волновой фронт анализировался датчиком Шэка — Гартмана с линзовым растром, состоящим из 8×8 субапертур с фокусным расстоянием $f \approx 2$ мм. Размер субапертуры составлял 64×64 пикселя и соответствовал расстоянию между центрами субапертур, равному 1 см.

Способ опережающей коррекции на основе анализа поперечного ветрового переноса волнового фронта. Поперечная составляющая скорости ветра (среднее значение) пропорциональна переносу светового поля на расстояние S . Перенос осуществлялся под действием ветра в плоскости линзового растра за период времени Δt , т. е.

$V_x = S/\Delta t$, где $S = D(N_{\text{lens}} - 1)$ — расстояние между анализируемыми линзами с диаметром D (N_{lens} — число линз в ряду их квадратной упаковки в растре). Время переноса определяется как отношение числа смещений турбулентного экрана N_{scr} за период $T = 1/\nu$ к частоте камеры ν , т. е. $\Delta t = N_{\text{scr}}/\nu$. В численном эксперименте видеокамера работала с частотой 200 кадр./с, т. е. время между кадрами составляло 5 мс. Каждому кадру соответствовало изображение гартманогаммы, представляющее совокупность центров тяжести фокальных пятен. Все параметры, регистрируемые в плоскости поперечных сечений пучков, нормированы на размер субапертуры данного датчика. На рис. 2, *a, b* представлена одна и та же строка двух гартманогамм. Гартманогамма на рис. 2, *b* получена в результате смещения турбулентного экрана на входной апертуре датчика на 64 пикселя, что соответствует размеру субапертуры в плоскости камеры или скорости поперечного ветрового переноса, равной 0,3 м/с.

Вычисление поперечной составляющей скорости ветра [5] основано на определении линейной зависимости между временными выборками значений столбцов матрицы. Матрица образована значениями смещений центроидов измеряемого волнового фронта относительно опорного: $\Delta\xi_k = \xi_k - \xi_k^0$, где ξ_k, ξ_k^0 — координаты центроидов измеряемого и опорного волновых фронтов. Координаты центроидов опорного волнового фронта соответствуют координатам центров субапертур. В каждый момент времени в плоскости видеокамеры регистрируется гартманогамма и рассчитывается её матрица. Вычисляются коэффициенты корреляции [7] элементов каждого столбца последней гартманогаммы или кадра относительно элементов всех столбцов всех предыдущих кадров за время T , соответствующее длине выборки N :

$$R_{xx} = \sum_{n=1}^N (\xi_n^m - \bar{\xi}^m)(\xi_n^l - \bar{\xi}^l) / \left[\sum_{n=1}^N (\xi_n^m - \bar{\xi}^m)^2 \sum_{n=1}^N (\xi_n^l - \bar{\xi}^l)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где $\bar{\xi}^m = \langle \xi_n^m \rangle$; $\bar{\xi}^l = \langle \xi_n^l \rangle$. Время T равно времени переноса замороженной турбулентности при минимальном значении скорости ветра, измеряемой данной системой. Затем определяется пара столбцов с максимальным значением корреляционной функции [7] и вычисляются разности между номерами этих столбцов. Разности умножаются на размер области

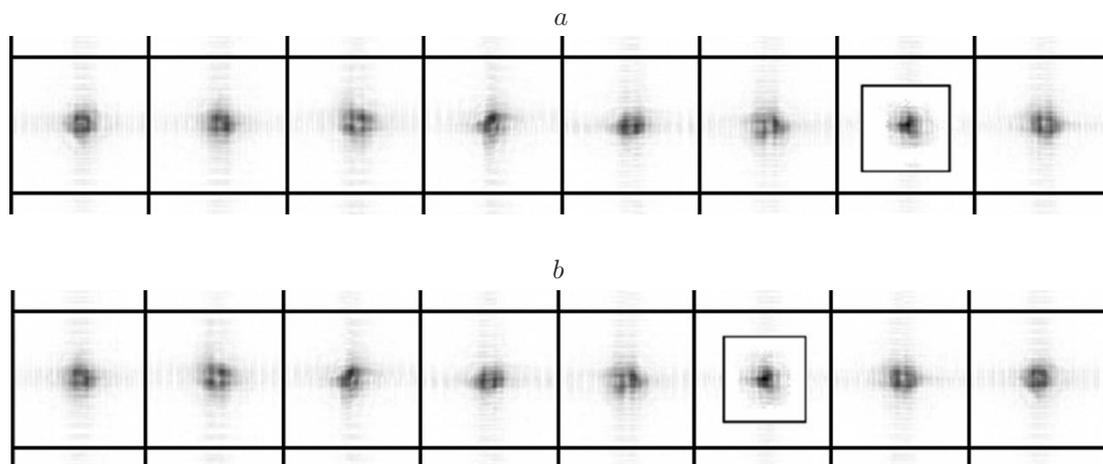


Рис. 2. Результат поперечного ветрового переноса турбулентности в плоскости регистрации: гартманогамма (*b*) смещена на одну субапертуру относительно гартманогаммы (*a*)

входной субапертуры, соответствующей направлению и расстоянию, которое проходят замороженные неоднородности за время, выраженное количеством кадров до момента, когда проявляется максимальная корреляция.

Целесообразно использовать дифференциальный подход [8], поскольку смещение изображения, определяемое дрожанием измерителя, может быть много больше смещений, обусловленных атмосферной турбулентностью. Суть дифференциального метода [8, 9] заключается в том, что в расчётах используются разности между элементами соседних столбцов матрицы, которая образована значениями смещений центроидов измеряемого волнового фронта относительно опорного. Строки и столбцы матрицы нумеруются сверху вниз и слева направо. Скорость ветра находится с помощью следующего алгоритма:

— вычисление коэффициентов корреляции элементов каждого столбца последнего кадра относительно элементов всех столбцов всех предыдущих кадров за время T , соответствующее длине выборки N (время T здесь равно времени переноса замороженной турбулентности при минимальном значении скорости ветра, измеряемого данным прибором);

— определение пары столбцов с максимальным значением корреляции R_{xx} ;

— умножение разности между номерами этих столбцов на размер области входной субапертуры.

Формула нахождения текущего значения мгновенной скорости поперечного ветрового переноса имеет вид

$$V_x = h(n_{\text{fin}} - n_{\text{corr}})/(N_{\text{corr}} \Delta t), \quad (6)$$

где h — шаг входной субапертуры; n_{fin} — номер столбца последнего кадра N_{fin} , образующего пару со столбцом с максимальной корреляцией; n_{corr} — номер столбца кадра N_{corr} , образующего пару со столбцом с максимальной корреляцией относительно столбца n_{fin} ; N_{corr} — номер кадра со столбцом с максимальной корреляцией относительно последнего кадра.

Для прогноза поверхности волнового фронта, воспроизводимой зеркалом, необходимо рассчитать форму этой поверхности в одну из сторон от центральной части датчика, имеющей точную геометрическую привязку к центру зеркала. Максимальная величина, на которую необходимо расширить входную апертуру датчика (так называемое «поле бокового зрения»), определяется величиной переноса при максимальной скорости ветра. В данном случае боковое поле входной апертуры должно составлять на анализируемой матрице не менее пяти столбцов вправо и пяти столбцов влево. Вследствие опережающего прогноза величины и направления ветрового переноса поверхность волнового фронта, формируемая на зеркале, смещается на расстояние S для времени τ :

$$S = V_x \tau = (h(n_{\text{fin}} - n_{\text{corr}})/(N_{\text{corr}} \Delta t)) \tau. \quad (7)$$

Результаты оценочных расчётов текущей скорости ветра показывают, что она вычисляется за различные по длительности интервалы времени, и это влияет на результат измерения при флуктуациях скорости ветра и снижает точность прогноза [10]. Кроме того, при большом числе кадров N значение коэффициента корреляции между столбцами существенно уменьшается, так как время измерения становится сравнимым со временем заморозки турбулентности τ_0 [11].

Способ опережающей адаптивной коррекции на основе анализа траектории движения координат центроидов. Как правило, расчёт опережающей коррекции основывается на анализе поведения уже реконструированной по координатам центроидов поверхности волнового фронта, что изначально требует большого объёма вычислений и дополнительно включает в себя все погрешности реконструкции [1]. Динамическая картина перемещения центроидов в плоскости регистрации датчика Шэка — Гартмана задаётся

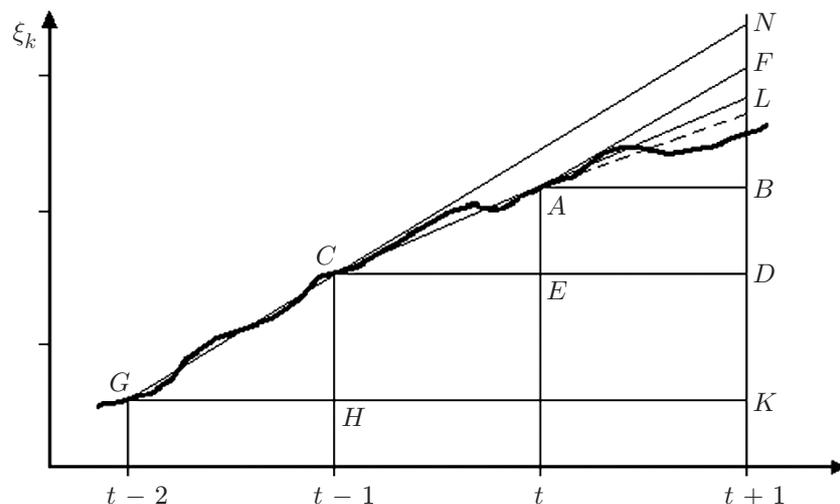


Рис. 3. Определение координаты ξ центраида в момент времени $t + 1$ по его координатам в моменты времени $t - 2$, $t - 1$ и t

движением оптических неоднородностей турбулентной атмосферы на входной апертуре датчика.

Пусть траектория движения центраида представляется случайной функцией. Для анализа изменения траектории воспользуемся разложением функции, описывающей изменение координаты центраида ξ , в ряд Тейлора [12]. Траектория движения ξ может быть представлена в виде

$$\xi_{t+\Delta t} = \xi_t + (\Delta\xi_t/\Delta t)\Delta t + 0,5\{(\Delta\xi_t/\Delta t - \Delta\xi_{t-1}/\Delta t)/\Delta t\}(\Delta t)^2. \quad (8)$$

В рамках временных ограничений, накладываемых гипотезой о замороженности турбулентности, при заданных ранее размерах датчика Шэка — Гартмана и поперечной составляющей скорости ветра здесь могут быть использованы результаты измерений только двух последних кадров, поэтому вычисление прогнозируемых значений центраидов ограничено тремя первыми членами ряда Тейлора (7).

На рис. 3 приведена иллюстрация механизма вычисления приращения по одной из координат, кривая представляет изменение координаты ξ k -го центраида во времени, измеряемом миллисекундами. Приращение координаты может быть записано как $\Delta\xi_t = \xi_t - \xi_{t-1}$. Координата центраида в момент времени $t - 1$, обозначенная ξ_{t-1} , — это точка C . Координата ξ_t соответствует точке A и представляет первую производную в момент $t + 1$: $AE = BL = (\Delta\xi_t/\Delta t)\Delta t$. Приращение Δt при вычислении производной в данном случае совпадает со временем между кадрами. Величина $\Delta\xi_t/\Delta t$ определяет скорость изменения координаты ξ от момента времени $t - 1$ до момента t и равна отрезку BL . Отрезок BF — отношение приращений $\Delta\xi_{t-1}/\Delta t$, которое определяет скорость изменения координаты ξ от момента времени $t - 2$ до момента $t - 1$.

Изменение скорости смещения координаты центраида от момента времени $t - 2$ до момента t может быть записано в виде $(\Delta\xi_t/\Delta t - \Delta\xi_{t-1}/\Delta t)/\Delta t$, соответствует отрезку LF и является ускорением, с которым меняется скорость изменения координаты ξ . Пунктирная линия — значения прогнозируемой величины при различных τ . Тогда траектория движения координаты ξ согласно формуле (7) выражается как

$$\xi_{t+\Delta t} = \xi_t + (\Delta\xi_t/\Delta t)\Delta t + 0,5\{(\Delta\xi_t/\Delta t - \Delta\xi_{t-1}/\Delta t)/\Delta t\}(\Delta t)^2. \quad (9)$$

Для конкретной адаптивной системы отношение времени прогноза τ ко времени между кадрами не меняется, т. е. $\tau/\Delta t = \text{const}$ и $\tau/\Delta t \leq 1$:

$$\xi_{t+\tau} = \xi_t + \Delta\xi_t\tau/\Delta t + 0,5(\Delta\xi_t - \Delta\xi_{t-1})\tau/\Delta t, \quad (10)$$

где третье слагаемое определяет изменение скорости смещения координаты ξ центроида от момента времени $t-2$ до момента t ; $\Delta\xi_{t-1} = \xi_{t-1} - \xi_{t-2}$.

При вычислении прогнозируемой координаты на малом отрезке времени первая производная соответствует скорости изменения формы поверхности волнового фронта, т. е. разностям координат центроидов $\xi_t - \xi_{t-1}$, $\eta_t - \eta_{t-1}$, определённых в моменты времени t и $t-1$, а вторая производная, выражающая ускорение изменения, — разностям $\Delta\xi_t - \Delta\xi_{t-1}$, $\Delta\eta_t - \Delta\eta_{t-1}$ в те же моменты времени. Вычисление производных выполняется по N последним кадрам, что позволяет рассчитать прогнозируемую трёхмерную поверхность распределения фазы, которая через время τ будет соответствовать входящему волновому фронту. Таким образом, координаты центроидов, соответствующие фазовому распределению на апертуре датчика в момент времени $t + \tau$, вычисляются как

$$\xi_{t+\tau} = \xi_t + \{\Delta\xi_t + 0,5(\Delta\xi_t - \Delta\xi_{t-1})\}\tau/\Delta t = \xi_t + 0,5(3\xi_t - 4\xi_{t-1} + \xi_{t-2})\tau/\Delta t, \quad (11)$$

$$\eta_{t+\tau} = \eta_t + \{\Delta\eta_t + 0,5(\Delta\eta_t - \Delta\eta_{t-1})\}\tau/\Delta t = \eta_t + 0,5(3\eta_t - 4\eta_{t-1} + \eta_{t-2})\tau/\Delta t, \quad (12)$$

где $\xi_{t+\tau}$, $\eta_{t+\tau}$ — координаты центроидов на момент прогноза; ξ_t , η_t — по измерениям последнего кадра; ξ_{t-1} , η_{t-1} — предпоследнего кадра; ξ_{t-2} , η_{t-2} — второго от последнего кадра.

В адаптивной оптической системе при вычислении смещений координат центроидов измеряемого волнового фронта относительно опорного в качестве опорной гартманогаммы следует использовать результаты интегрирования полученных в течение некоторого временного интервала изображений фокальных пятен. Это позволяет уменьшить ошибку, обусловленную измерительной системой. Для уменьшения ошибки предложено [7] применять алгоритм, который помещает анализируемые окна в центры наибольшей интенсивности изображений фокальных пятен, постоянно отслеживая их положение. Данный подход даёт возможность наиболее точно установить координаты центроидов.

В целях определения возможности реализации опережающей коррекции на основе анализа траектории движения координат центроидов проведена оценка динамических характеристик волнового фронта на входной апертуре датчика Шэка — Гартмана. Анализ динамики характеристик волнового фронта был выполнен также на основе численного моделирования движения турбулентного экрана (4).

Результаты численных экспериментов и их обсуждение. На рис. 4, $a-f$ показаны приходящие в моменты времени t и $t+1$ на входную апертуру датчика волновые фронты (полутоновые распределения a и b соответственно), заданные формулой (4).

Реконструкция волновых фронтов из гартманогаммы в проведённых численных экспериментах осуществлялась на основе стандартного представления абберации волнового фронта в виде разложения по полиномам Цернике [4]. Волновой фронт, реконструированный по смещениям координат центроидов [3], соответствует распределениям c и d в моменты времени t и $t+1$. Волновой фронт в виде распределения e является результатом опережающей коррекции на основе определения скорости поперечного ветрового переноса волнового фронта. Результаты применения второго способа опережающей адаптивной

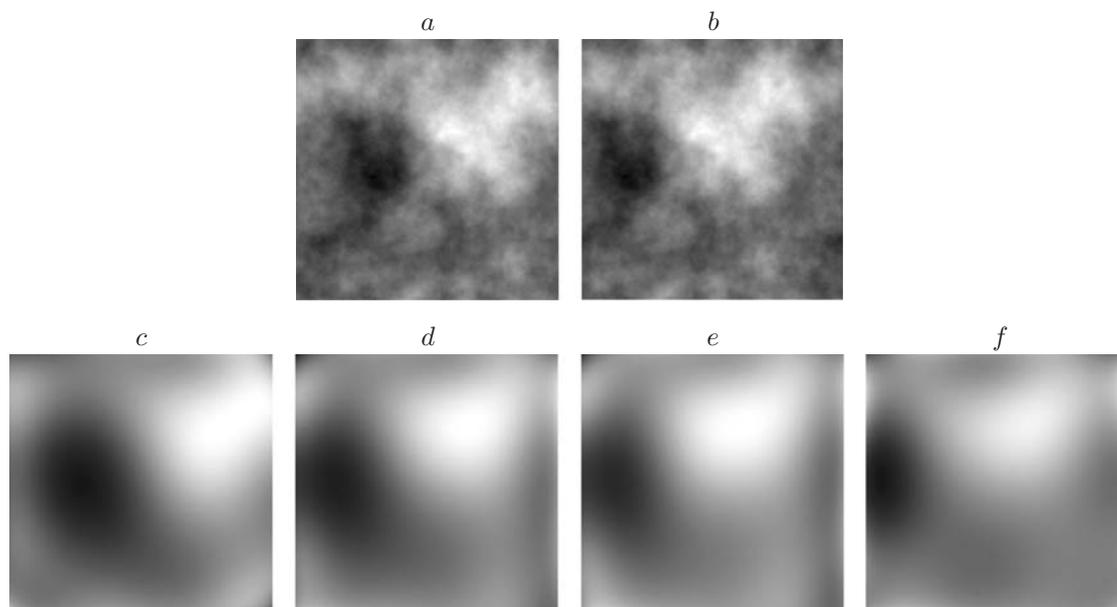


Рис. 4. Распределения волнового фронта: a, b — на входной апертуре датчика в моменты времени t и $t + 1$; c, d — результаты реконструкции волновых фронтов a и b ; e, f — результаты опережающего прогноза по скорости поперечного ветра и по прогнозируемым координатам центроидов соответственно

коррекции на основе анализа траектории движения координат центроидов проиллюстрированы распределением f . Без опережающей коррекции зеркало воспроизводило бы фазовую поверхность, представленную распределением c .

Принимая распределение c за эталон, вычислим средние квадратичные отклонения распределений b, e и f от распределения c . Положим, что без опережающей коррекции зеркало воспроизводит фазовую поверхность с ошибкой 100 %, тогда ошибка фазовой поверхности зеркала с опережающей коррекцией на основе определения скорости поперечного ветрового переноса волнового фронта составляет 47 % и на основе анализа траектории движения координат центроидов — 53 %.

Профили реконструированных волновых фронтов в численных экспериментах по опережающей коррекции с прогнозом длительностью $\tau = 2$ мс приведены на рис. 5. Кривая, изображающая профиль, соответствует строке пикселей, проходящей через центр трёхмерного распределения волнового фронта.

Реализация опережающей адаптивной коррекции на основе измерения скорости ветра возможна, пока длительность опережающего прогноза τ меньше времени ветрового переноса радиуса когерентности через оптический пучок [1]: $\tau_a = 2a_0/V_x$, где a_0 — радиус входной апертуры датчика Шэка — Гартмана, т. е. $\tau_a = D(N_{\text{lens}} - 1)/V_x$.

Эффективность опережающей адаптивной коррекции зависит от интенсивности турбулентных искажений и от длительности прогноза τ . На рис. 6 показано изменение дисперсии σ^2 волнового фронта, прогнозируемого на основе поперечного ветрового переноса, и соответствующих значений фактического волнового фронта в зависимости от отношения a_0/r_0 , характеризующего интенсивность фазовых искажений, для различных значений временной задержки τ (кривые 1–3 для $\tau = 1, 2, 3$ мс). Кривая 4 представляет изменение дисперсии разности значений волнового фронта, приходящего на апертуру датчика в момент времени t и воспроизводимого зеркалом без опережения, и соответствующих значений фактического волнового фронта, приходящего в момент времени $t + 1$.

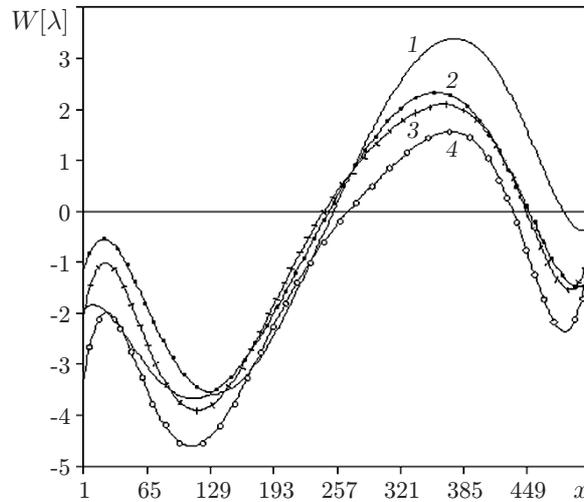


Рис. 5. Профили реконструированных волновых фронтов W : кривая 1 — световое поле на входной апертуре датчика в момент времени t ; 2, 3 — результаты опережающей коррекции в момент времени $t + \tau$ по прогнозируемым координатам центроидов и по скорости поперечного ветра соответственно; 4 — в момент времени $t + 1$

Эффективность опережающей адаптивной коррекции слабых турбулентных искажений ($r_0 = 10$ см) составляет 87 % при $\tau = 1$ мс; 79 % при $\tau = 2$ мс; 75 % при $\tau = 3$ мс. Коррекция средних турбулентных искажений ($r_0 = 5$ см) оценивается как 81, 74 и 67 % при $\tau = 1, 2, 3$ мс соответственно. Эффективность коррекции сильных турбулентных искажений ($r_0 = 1$ см) имеет оценки 80, 66 и 55 % при тех же значениях τ .

Для опережающей коррекции может быть применён комбинированный подход в виде двух последовательных шагов. На первом шаге методом корреляционного анализа вычисляется значение поперечной составляющей скорости ветра на входной апертуре V'_x . На втором шаге анализируется её величина. Если $V'_x > V_x$, где V_x — скорость ветрового переноса радиуса когерентности через оптический пучок, т. е. время переноса не превышает

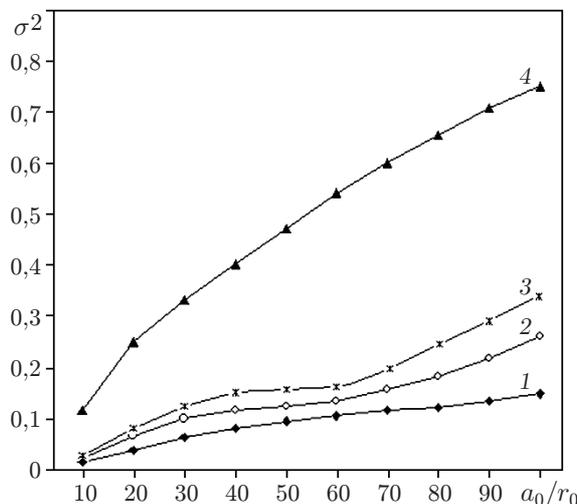


Рис. 6. Дисперсия отклонений прогнозируемого волнового фронта относительно фактического в зависимости от интенсивности фазовых искажений

длительности опережающего прогноза τ , то рассчитывается корректирующая поверхность и затем смещается на величину $S = V'_x \tau$ в направлении ветрового переноса. Если $V'_x < V_x$, то на основе анализа траектории движения координат центроидов формируется корректирующая поверхность с координатами $\xi_{t+\tau}$, $\eta_{t+\tau}$.

Заключение. В основе опережающей адаптивной коррекции, так же как в любом методе прогнозирования [13, 14], лежит предобработка данных, т. е. временных рядов. Здесь временной ряд представляет совокупность координаты центроида в течение нескольких последовательных моментов. Кроме того, в каждом временном ряде отслеживается трендовая составляющая и учитывается случайная составляющая. Но в отличие от существующих методов, строящих прогноз на данных, меняющихся со временем, т. е. только вдоль временной оси, опережающая коррекция, опираясь на гипотезу о замороженности турбулентности, строит прогноз с учётом изменения координаты центроида и вдоль временной оси, и в плоскости гартманогаммы, где координата изменяется под действием поперечного ветрового переноса. В первом способе поперечная составляющая скорости ветра измеряется явно, во втором в каждый момент времени вычисляются градиенты координат центроидов, обусловленные поперечным ветровым переносом.

Рассмотренные в данной работе методы применимы для системы с гибкими зеркалами, имеющими постоянную времени срабатывания, соизмеримую со временем кадра камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zuev V. E., Lukin V. P. Dynamic characteristics of optical adaptive systems // Appl. Opt. 1987. **26**, N 1. P. 139–144.
2. Антошкин Л. В., Лавринова Л. Н., Лавринов В. В. и др. Оптимизация управления активным биморфным зеркалом на основе датчика Гартмана // Межвуз. сб. науч. тр. «Методы и устройства передачи и обработки информации». М.: Радиотехника, 2009. Вып. 11. С. 25–34.
3. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
4. Лавринова Л. Н., Лукин В. П. Адаптивная коррекция тепловых и турбулентных искажений лазерного излучения деформируемым зеркалом. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. 152 с.
5. Антошкин Л. В., Лавринов В. В., Лавринова Л. Н., Лукин В. П. Измерение поперечного ветрового переноса атмосферной турбулентности на основе датчика Шэка — Гартмана // Горный информационно-аналитический журн. 2009. **17**, № 12. С. 129–133.
6. Лукин В. П., Фортес Б. В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
7. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.
8. Антошкин Л. В., Лавринов В. В., Лавринова Л. Н., Лукин В. П. Дифференциальный метод в измерении параметров турбулентности и скорости ветра датчиком волнового фронта // Оптика атмосферы и океана. 2008. **21**, № 1. С. 75–80.
9. Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др. Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 1998. **11**, № 11. С. 1219–1223.
10. Афанасьев А. Л., Банах В. А., Ростов А. П. Определение скорости ветра в атмосфере по турбулентным искажениям видеоизображений лазерного пучка // Оптика атмосферы и океана. 2010. **23**, № 8. С. 723–729.

11. **Ростов А. П.** Ультразвуковой комплекс для исследования пространственно-временных характеристик полей ветра и температуры // Оптика атмосферы и океана. 1999. **12**, № 2. С. 154–158.
12. **Федосов Б. Т.** Прогнозирование, анализ, синтез и моделирование сигналов управления // Сайт о моделировании систем и явлений.
URL: http://model.exponenta.ru/bt/bt_0005.html#L05 (дата обращения: 8.11.2011).
13. **Ефимов В. М., Резник А. Л., Торгов А. В., Тузиков А. В.** Использование алгоритма компенсации линейных искажений для решения систем линейных алгебраических уравнений с ленточными матрицами // Автометрия. 2010. **46**, № 1. С. 23–33.
14. **Бабаян П. В.** Выделение объектов в условиях случайных геометрических преобразований изображения // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 41–47.

Поступила в редакцию 8 ноября 2011 г.
