

Методы опережающего формирования фазовой поверхности на основе измерений датчика Шэка–Гартмана

Л.В. Антошкин, В.В. Лавринов, Л.Н. Лавринова, В.П. Лукин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.06.2011 г.

Адаптивная система обеспечивает коррекцию турбулентных искажений, которые были определены в предыдущий момент времени, но к моменту исправления их системой претерпевают изменения. Опережающая адаптивная коррекция позволяет задать профиль рабочего зеркала, соответствующий волновому фронту на входной апертуре адаптивной системы на будущий момент времени, по прошлому измерению датчика волнового фронта Шэка–Гартмана. Представлены способы опережающего формирования профиля корректирующего зеркала.

Ключевые слова: прогноз, координаты центра, время «замороженности» турбулентности, поперечная составляющая скорости ветра, случайный фазовый экран, дифференциальный метод, датчик волнового фронта; prediction, coordinates of the centroid, frozen time turbulence, cross-wind component, random phase screen, differential method, wave front sensor.

Введение

Адаптивная оптическая система (АОС) рассматривается как динамическая система с обратной связью и как система с постоянным запаздыванием [1, 2], когда адаптивное зеркало воспроизводит фазовую поверхность, соответствующую волновому фронту на входной апертуре системы, со значительной задержкой во времени.

Авторами [1, 2] впервые была предложена адаптивная коррекция с прогнозированием. На основе различных схем статистического прогнозирования случайных фазовых искажений были выполнены расчеты погрешностей при оценке среднего поля и средней интенсивности поля в АОС с постоянным запаздыванием и получена оценка улучшения качества коррекции в системе с прогнозом по сравнению с системой постоянного запаздывания. Показано, что улучшить временные динамические характеристики адаптивной системы и уменьшить влияние остаточных искажений, обусловленных временным запаздыванием в контуре обратной связи, можно, предварительно определив временные корреляционные функции флуктуаций модовых составляющих фазы. Решение проблемы прогнозирования волнового фронта сегодня представлено положительными результа-

тами как численных [3–6], так и натуральных экспериментов [7].

Применение в адаптивных системах технологически новых элементов и средств обработки информации – высокоскоростных видеокамер, более совершенных моделей корректоров и мощных компьютеров – делает управление лазерным излучением более быстродейственным и высокоточным, однако не решает проблемы с постоянным запаздыванием АОС.

Решить данную проблему можно единственным способом: уменьшить временную задержку, реализуя адаптивную коррекцию с опережением, т.е. подавать управляющие воздействия на зеркало, вычисленные относительно волнового фронта, измеряемого в данный момент. В настоящей статье предлагаются варианты работы системы с переходом от прогнозирования модовых составляющих [1, 2] к опережающей адаптивной коррекции в реальном масштабе времени.

Необходимым условием осуществления опережающей адаптивной коррекции является то, что и время срабатывания системы τ_a , и длительность прогноза τ должны быть много меньше времени ветрового переноса «замороженной» турбулентности через оптический пучок [1]. Время «замороженности» турбулентности τ_0 связано с радиусом Фрида r_0 и поперечной составляющей скорости ветра V_x следующим соотношением [8]:

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

* Леонид Владимирович Антошкин; Виталий Валериевич Лавринов; Лидия Николаевна Лавринова (lnl@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

Для осуществления опережающей коррекции на гибкое зеркало подается сигнал управления, рассчитанный таким образом, чтобы в момент окончания переходных процессов на зеркале сформировалась поверхность, соответствующая волновому фронту, который приходит на входную апертуру системы именно в этот момент времени. С целью исследований эффективности опережающей адаптивной коррекции и способов ее реализации был проведен ряд численных экспериментов.

Описание численного эксперимента

В основе численного эксперимента лежит решение параболического уравнения квазиоптики, описывающего распространение через турбулентную атмосферу светового поля с комплексной амплитудой $E = \mathbf{E}(\rho, z, t)$ [9]:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + 2k^2 \tilde{n}(x, y) E, \quad (2)$$

где $\tilde{n}(x, y)$ – случайное поле флуктуаций показателя преломления, связанное с турбулентной атмосферой; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны; $\rho = |\mathbf{r}|$, $\mathbf{r} = (x, y)$ – координаты в поперечном сечении светового поля.

Турбулентные или случайные фазовые искажения моделируются спектром фон Кармана [9]:

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

где $\mathbf{j}_0 = 2\pi/L_0$, $\mathbf{j}_m = 5,92/l_0$; L_0, l_0 – внешний и внутренний масштабы неоднородностей. Интенсивность фазовых флуктуаций характеризуется радиусом Фрида r_0 . В экспериментах $L_0 = 10$ м, $l_0 = 1$ мм, $r_0 = 5$ см. Модель турбулентности, движущейся в поперечном направлении к распространению светового поля со скоростью ветра V_x , представлялась совокупностью коррелированных случайных фазовых экранов, каждый из которых, начиная со второго, является результатом смещения в том же направлении первого экрана (3).

Численные эксперименты проводились по следующему сценарию: гауссов пучок радиусом $a_0 = 10$ см проходил через турбулентный экран (3), затем на входной апертуре датчика линзовым растром, состоящим из 64 микролинз (8×8), делился на отдельные пучки, которые фокусировались в плоскости фотоприемного устройства. Расчеты проводились на сетке, содержащей 512×512 узлов.

Приемное устройство видеокamеры позволяет измерять дисперсию угла прихода, которая обычно составляет $(1 - 10)''$. Максимально допустимое значение углового смещения энергетического центра тяжести фокального пятна (центроида) составляет $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-3}$ рад. Диаметр фокального пятна зависит от разрешения видеокamеры, диаметра и фокуса микролинзы. Чтобы фокальное пятно не выходило за пределы отведенной ему области, случайные смещения центроида не должны превышать $1/3$ радиуса дифракционного изображения; $D_f = 1,619\lambda/D$ –

радиус фокального пятна, соответствующий радиусу третьей темной полосы в дифракционной картине Эйри, D – диаметр микролинзы.

При разрешении камеры 512×512 пикселей размер субапертуры составляет 64×64 пикселя; размер одного пикселя камеры 10×10 мкм; размер субапертуры 640×640 мкм и соответствует микролинзе размером 3×3 мм. Фокальное расстояние линзы $f = D_f/2\alpha = 1,619\lambda/2\alpha D$. Таким образом, $f \approx 2$ м для $\lambda = 0,63$ мкм. Максимально допустимое значение смещения составляет $1,7 \cdot 10^{-6}$ м.

На каждой субапертуре наклон волнового фронта оценивался в плоскости регистрации по смещениям центроидов измеряемой гартманогаммы относительно опорной. Координаты центроидов ξ_k, η_k вычислялись по формулам [10]:

$$\xi_k = \sum_{i=1}^{n_i} i I_i / \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}, \quad \eta_k = \sum_{j=1}^{n_j} j I_j / \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}, \quad (4)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^{n_j} I_{ij}, \quad I_j = \sum_{i=1}^{n_i} I_{ij},$$

где I_{ij} – измеренное значение интенсивности сигнала элемента с координатами i, j ; k – номер центроида в плоскости гартманогаммы.

При расчете координат центроидов к источникам ошибки относятся амплитудное распределение на входной апертуре датчика и фотосигнальная характеристика пикселя на фотоприемном устройстве [11]. По нашим оценкам, ошибка, вносимая в измерения координат центроидов за счет влияния характеристики гауссова распределения интенсивности в световом поле, незначительна, при этом ее снижение приводит к равноценному уменьшению диапазона измеряемого угла наклона волнового фронта.

В качестве фотоприемного устройства в датчике Шэка–Гартмана используются видеокamеры. Удешевление их элементной базы, а также появление все более мощных средств обработки больших массивов данных с высокой скоростью способствуют эффективному использованию видеокamер и в адаптивной оптике. Видеокamеры с датчиками изображения, выполненными по технологиям ПЗС и КМОП, имеют ряд отличий, в том числе обладают различными фотосигнальными характеристиками пикселя [11]. Применение фотоприемных устройств КМОП расширяется значительно интенсивней, чем более дорогих ПЗС-преобразователей изображения.

Опережающая адаптивная коррекция на основе анализа поперечного ветрового переноса волнового фронта

Значение поперечной составляющей скорости ветра пропорционально переносу светового поля на расстояние S в плоскости линзового растра за период времени Δt [10]: $V_x = S/\Delta t$, где $S = D(N_{lens} - 1)$ – расстояние между анализируемыми линзами диаметром D ; N_{lens} – число линз в ряду упаковки квадрат-

ного линзового раstra. Время переноса определяется как отношение числа смещений турбулентного экрана N_{scr} за период $T = 1/\nu$ к частоте камеры ν : $\Delta t = N_{scr}/\nu$. Численный эксперимент соответствовал работе видеокамеры с частотой 200 кадр./с, время между кадрами составляло 5 мс.

Вычисление поперечной составляющей скорости ветра [10] основано на определении линейной зависимости между временными выборками элементов в столбцах 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 волнового фронта и опорного соответственно; $k = 1, \dots, 64$ – номер субапертуры. Матрица размерностью $N_{lens} \times N_{lens}$ имеет вид $(\Delta \xi_{ij})$, $i, j = 1, \dots, N_{lens}$, $k = i + (j - 1)N_{lens}$, $N_{lens} = 8$.

Анализируется одна из двух координат центроидов в соответствии с условием поперечного ветрового переноса турбулентности. В каждый момент времени в плоскости камеры регистрируется гартманогрaмма и рассчитывается соответствующая ей матрица. Скорость ветра определяется в результате анализа столбцов совокупности матриц длиной выборки N .

Коэффициент линейной корреляции между двумя столбцами $(\Delta \xi_{il})$ и $(\Delta \xi_{im})$ вычисляется следующим образом [12]:

$$R_{xx} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{lens}} (\Delta \xi_{il} - \Delta \bar{\xi}_{il})(\Delta \xi_{im} - \Delta \bar{\xi}_{im})}{\left[\sum_{i=1}^{N_{lens}} (\Delta \xi_{il} - \Delta \bar{\xi}_{il})^2 \sum_{i=1}^{N_{lens}} (\Delta \xi_{im} - \Delta \bar{\xi}_{im})^2 \right]^{1/2}}, \quad (5)$$

где

$$l = j + N_l N_{lens}; \quad m = j + N_m N_{lens}; \\ N_l, N_m = 0, 1, \dots, N - 1$$

– номера анализируемых гартманогрaмм.

При адаптивной коррекции турбулентных искажений целесообразно использовать дифференциальный подход [13], поскольку смещение изображения, определяемое дрожанием датчика волнового фронта, может быть много больше смещений, обусловленных атмосферной турбулентностью. Суть дифференциального метода [13, 14] заключается в том, что в расчетах используются разности между элементами соседних столбцов матрицы. Анализ матрицы $(\Delta \xi_{ij} - \Delta \xi_{i(j+1)})$ размерностью $(N_{lens} - 1) \times N_{lens}$ позволяет минимизировать ошибки измерений, возникающие в результате собственных колебаний датчика.

Скорость ветра определяется в результате анализа матрицы $(\Delta \xi_{ij} - \Delta \xi_{i(j+1)})$: вычисляются коэффициенты корреляции элементов каждого столбца последней гартманогрaммы или кадра относительно элементов всех столбцов всех предыдущих кадров за время T , соответствующее длине выборки N . Время T равно времени переноса «замороженной» турбулентности при минимальном значении скорости

ветра, измеряемого данным прибором. Затем определяется пара столбцов с максимальным значением корреляционной функции R_{xx} и вычисляются разности между номерами этих столбцов. Разности умножаются на размер области входной субапертуры, соответствующей расстоянию и направлению, которое проходят «замороженные» неоднородности за время, выраженное количеством кадров до момента, когда проявляется максимальная корреляция:

$$V_x = h(n_{final} - n_{corr})/N_{corr}\Delta t,$$

где h – размер входной субапертуры; n_{final} – номер столбца последнего кадра N_{final} , образующего пару с максимальной корреляцией; n_{corr} – номер столбца кадра N_{corr} , образующего пару с максимальной корреляцией относительно столбца n_{final} ; N_{corr} – номер кадра со столбцами с максимальной корреляцией относительно последнего кадра. На рис. 1 представлены результаты эксперимента.

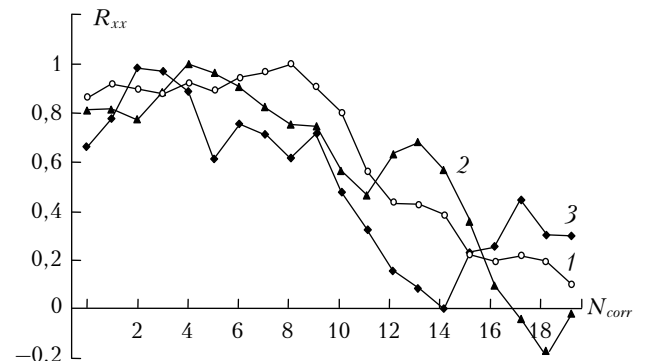


Рис. 1. Значения корреляции между выборками координаты ξ центроидов пар столбцов гартманогрaммы при скорости ветра: 0,25, 0,5, 1,0 м/с (кривые 1, 2 и 3)

Выборка состояла из 20 кадров, или 20 гартманогрaмм, или 160 анализируемых столбцов. Вычисление коэффициентов корреляции всех столбцов последней (20-й) гартманогрaммы со всеми 160 столбцами выборки позволило выбрать пару столбцов с максимальным значением корреляционной функции R_{xx} . Разница между номерами данных столбцов, умноженная на размер субапертуры, соответствует расстоянию, которое проходят неоднородности: при скорости ветра 0,25 м/с – восьмой кадр; при 0,5 м/с – четвертый; при 1,0 м/с – второй.

Для прогноза поверхности волнового фронта, воспроизводимой зеркалом, необходимо рассчитать форму этой поверхности в одну из сторон от центральной части датчика, имеющей точную геометрическую привязку с центром зеркала. Максимальная величина, на которую необходимо расширить входную апертуру датчика (назовем ее «полем бокового зрения»), определяется величиной переноса при максимальной скорости ветра. В данном случае при максимальном значении скорости ветра «боковое поле» входной апертуры должно составлять на анализируемой матрице не менее 5 столбцов вправо и 5 столбцов влево.

Опережающая адаптивная коррекция на основе анализа движения координат центроидов

Движение оптических неоднородностей турбулентной атмосферы на входной апертуре датчика волнового фронта Шэка—Гартмана определяет перемещение центроидов в плоскости регистрации.

Пусть траектория движения центроидов представляется случайной функцией $s(t)$. Для анализа изменения траектории воспользуемся разложением функции $s(t)$ в ряд Тейлора [15, 16]. Траектория движения центроидов $s(t)$ может быть представлена в виде

$$s(t + \tau) = s(t) + \frac{s'(t)\tau}{1!} + \frac{s''(t)\tau^2}{2!} + \frac{s'''(t)\tau^3}{3!} + \dots \quad (6)$$

Сигнал сложной формы $s(t + \tau)$ представляется взвешенной суммой простых стандартных степенных сигналов вида τ^q . Значения сигнала для последующих моментов времени определяются как сумма исходного значения сигнала и его приращений, обусловленных скоростью $s'(t)$, ускорением $s''(t)$ и производными по времени более высокого порядка.

В рамках временных ограничений, накладываемых гипотезой «замороженности» турбулентности, при заданных размерах датчика Шэка—Гартмана и поперечной составляющей скорости ветра, здесь могут быть использованы результаты измерений только двух последних кадров, поэтому вычисление прогнозируемых значений центроидов ограничено тремя первыми членами ряда Тейлора (6). Траектория движения координаты ξ , согласно формуле (6), может быть представлена в виде

$$\xi_{t+\Delta t} = \xi_t + \frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} \Delta t + 0,5 \left\{ \left(\frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} - \frac{\Delta \xi_{t-1}}{\Delta t} \right) / \Delta t \right\} (\Delta t)^2. \quad (7)$$

Для конкретной адаптивной системы отношение времени прогноза ко времени между кадрами не меняется, т.е. $\tau/\Delta t = \text{const}$, $\tau/\Delta t < 1$, тогда значение координаты ξ в момент времени $t + \tau$ вычисляется как

$$\xi_{t+\tau} = \xi_t + \Delta \xi_t \frac{\tau}{\Delta t} + 0,5 (\Delta \xi_t - \Delta \xi_{t-1}) \frac{\tau}{\Delta t}, \quad (8)$$

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

При вычислении прогнозируемых координат на малом отрезке времени первая производная соответствует скорости изменения формы поверхности волнового фронта, т.е. разностей координат центроидов $\xi_t - \xi_{t-1}$, $\eta_t - \eta_{t-1}$, определенных в моменты времени t и $t - 1$. Вторая производная, выражающая ускорение изменения, соответствует 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 послед-

ним кадрам. Измерение скорости изменения координат центроидов в результате обработки последнего кадра позволяет получить пространственное представление волнового фронта через время τ .

На рис. 2 представлена принципиальная схема реализации прогноза на основе анализа первой и второй производных изменения поверхности волнового фронта от кадра к кадру.

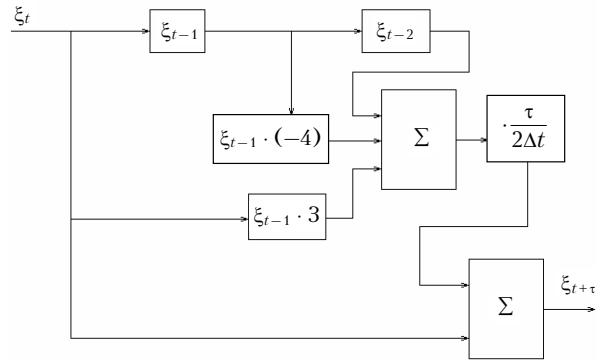


Рис. 2. Схема вычисления координаты ξ центроида в момент времени $t + \tau$

Входящий сигнал, который определяет координату центроида ξ в момент времени t , приложен к сдвиговому регистру. Каждый шаг сдвигового регистра задерживается на один стандартный период работы видеокамеры, равный $\Delta t = 1/v$. Сумма, состоящая из входящего сигнала ξ_t , умноженного на коэффициент, равный 3, из результата первого задержанного шага, умноженного на коэффициент, равный -4 , и из результата второго задержанного шага, дает оценочное значение прогнозируемой координаты центроида.

Таким образом, координаты центроидов, соответствующие фазовому распределению на апертуре датчика в момент времени $t + \tau$, вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \xi_{t+\tau} &= \xi_t + \left\{ \Delta \xi_t + 0,5 (\Delta \xi_t - \Delta \xi_{t-1}) \right\} \frac{\tau}{\Delta t} = \\ &= \xi_t + 0,5 (3\xi_t - 4\xi_{t-1} + \xi_{t-2}) \frac{\tau}{\Delta t}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \eta_{t+\tau} &= \eta_t + \left\{ \Delta \eta_t + 0,5 (\Delta \eta_t - \Delta \eta_{t-1}) \right\} \frac{\tau}{\Delta t} = \\ &= \eta_t + 0,5 (3\eta_t - 4\eta_{t-1} + \eta_{t-2}) \frac{\tau}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\xi_{t+\tau}$, $\eta_{t+\tau}$ — координаты центроидов на момент опережающего 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.

На рис. 3 представлена среднеквадратическая ошибка определения координаты центроида для расчета сигнала отработки адаптивной системой на основе анализа движения координат центроидов по схеме, представленной на рис. 2, при различных значениях скорости ветра.

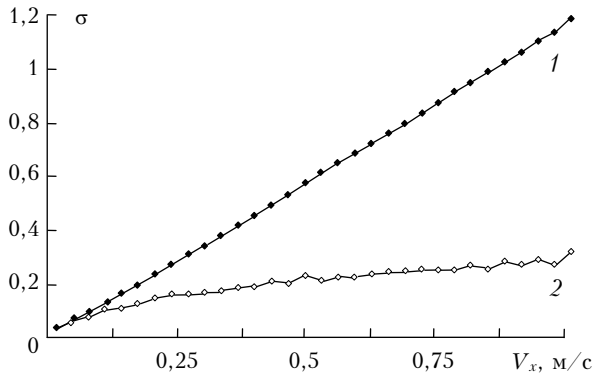


Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка вычисления ξ по последнему значению координаты (кривая 1) и с коррекцией $\tau = \Delta t$ (кривая 2)

Скорость задавалась варьированием времени между анализируемыми кадрами. Кривой 1 представлен прогноз по последнему значению, что соответствует работе адаптивной системы с постоянным запаздыванием: $\xi_{t+\tau} = \xi_t$. Кривая 2 характеризует изменение среднеквадратической ошибки определения ξ для адаптивной системы с коррекцией, опережающей на время τ , соответствующее одному кадру, и представляет вычисление ξ с опережением по формуле (9). Для выборки длиной 4096 реализаций достоверность определения ξ для адаптивной системы с опережающей коррекцией (кривая 2) составила 0,1%.

Для сигнала со спектром, содержащим средние и низкие пространственные частоты (в интервале изменения скорости ветра до 0,25 м/с), опережающая коррекция дает наименьшую ошибку при расчете сигналов обработки системой, что всего более соответствует условию гладкости функции в разложении ее по формуле Тейлора [16].

Комбинированный подход в реализации опережающей адаптивной коррекции

Для реализации опережающей коррекции может быть применен комбинированный подход в виде двух последовательных шагов. На первом шаге методом корреляционного анализа вычисляется значение поперечной составляющей скорости ветра на входной апертуре. На втором шаге анализируется ее величина. При значении скорости ветра, превышающем заданное, соответствующее времени «замороженности» турбулентности (1), рассчитывается корректирующая поверхность с учетом боковых зон и смещается на величину S в направления ветрового переноса. При скорости ветра ниже заданного значения корректирующая поверхность формируется на основе анализа траектории движения координат центроидов.

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

Методы опережающего формирования фазовой поверхности на основе измерений датчика Шэка–Гартмана 983
8. Оптика атмосферы и океана, № 11.

Анализ влияния времени экспозиции камеры на точность определения координат центроидов

Изменяя время экспозиции, мы на каждом пикселе фотоприемной матрицы осуществляем временное усреднение высокочастотных пульсаций координат центроидов, вызванных атмосферной турбулентностью. Очевидно, что время выдержки видеокамеры (время накопления) в каждом кадре влияет на ошибку прогноза. На рис. 4 показано изменение координат центроида ξ_k (а) и η_k (б) в режимах мгновенной выборки и в режиме экспозиции, равной полной длительности кадра.

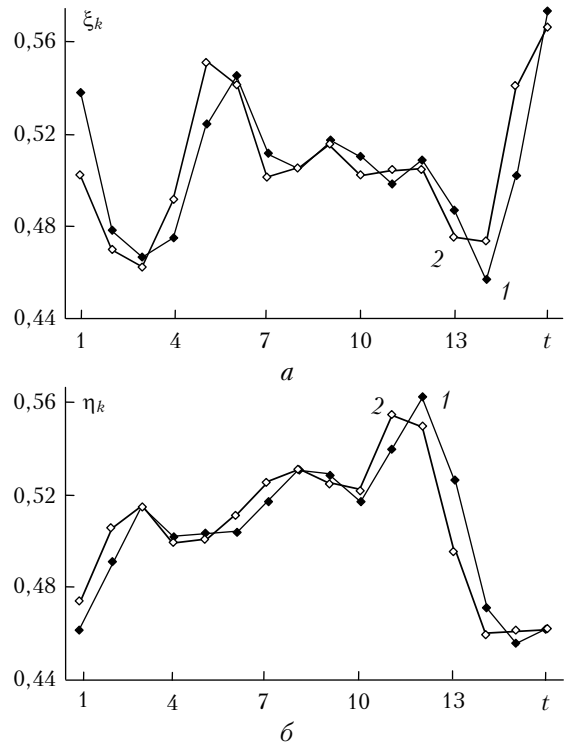


Рис. 4. Пульсации координат центроида при скорости ветра 1,0 м/с: 1 – мгновенная выборка; 2 – выборка с экспозицией, равной полной длительности кадра

Для работы со слабоосвещенными астрономическими объектами требуется увеличение времени экспозиции. Длина выборки, или время экспозиции видеокамеры, влияет на точность работы адаптивной оптической системы. Для оценки погрешности влияния времени экспозиции были рассмотрены режим мгновенной выборки и режим с экспозицией, равной полной длительности кадра, т.е. фактического интегрирования за время кадра высокочастотных пульсаций координат центроидов, вызванных атмосферной турбулентностью (3). На рис. 5 представлены результаты реконструкции волнового фронта в разных режимах.

Профили волновых фронтов, полученных в режиме мгновенной выборки координат центроидов и в режиме с экспозицией, равной полной длительности кадра, отличаются друг от друга и отличаются

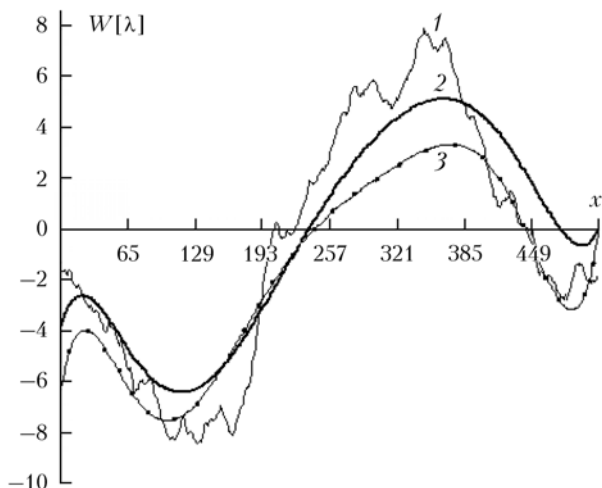


Рис. 5. Профили волновых фронтов: 1 — на входной апертуре датчика; реконструированных: 2 — в режиме с экспозицией, равной полной длительности кадра, 3 — в режиме мгновенной выборки

от профиля волнового фронта на входной апертуре датчика. В центральной части, где волновой фронт характеризуется наибольшим углом наклона, профили практически совпадают для обоих режимов выборки информации, т.е. общий наклон волнового фронта один и тот же для обоих режимов. На периферии отличие обусловлено наличием aberrаций высокого порядка. Усреднение координат центроидов или, в конечном итоге, углов наклона ведет к вычислению более высокого значения профиля волнового фронта (кривая 2). Время экспозиции влияет на точность реконструкции волнового фронта датчиком Шэка—Гартмана и определяется пространственными и временными характеристиками корректирующего зеркала.

Заключение

На основе численных экспериментов показано, что опережающее формирование фазового распределения, соответствующего волновому фронту на входной апертуре адаптивной системы, может быть осуществлено по измерениям датчика волнового фронта Шэка—Гартмана, тем самым может быть решена проблема временной задержки в контуре адаптивной системы. Несмотря на случайный характер взаимодействия излучения и турбулентной атмосферы, основные тенденции в этом взаимодействии могут быть в определенной степени предсказуемы, так как с учетом времени «замороженности» турбулентности скорость поперечного ветрового переноса турбулентных искажений может быть определена по измерениям датчика волнового фронта Шэка—Гартмана. Применение методов теории прогнозирования предполагает существование оптимальных значений

прогнозируемого волнового фронта. И наконец, знание основных характеристик элементов датчика волнового фронта (в первую очередь видеокамеры), а также пространственных и временных характеристик корректирующего зеркала позволяет рассчитать прогнозируемые изменения координат центроидов с достаточной точностью.

1. *Лукин В.П.* Динамические характеристики прогнозируемых адаптивных оптических систем // *Радиотехн. и электрон.* 1986. Т. XXXI, № 9. С. 1808–1812.
2. *Zuev V.E., Lukin V.P.* Dynamic characteristic of optical adaptive systems // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. P. 139–144.
3. *Jorgenson M.B., Aitken George J.M.* Prediction of atmospherically induced wave-front degradations // *Opt. Lett.* 1992. V. 17, N 7. P. 466–468.
4. *Wild W.J.* Predictive optimal estimators for adaptive-optics systems // *Opt. Lett.* 1996. V. 21, N 18. P. 1433–1435.
5. *Montera D.A., Welsh B.M., Roggemann M.C., Ruck D.W.* Prediction of wave-front sensor slope measurements with artificial networks // *Appl. Opt.* 1997. V. 36, N 3. P. 675–681.
6. *Barclay J.D.* Multigrid approach to predictive wave-front reconstruction in adaptive optical systems // *Appl. Opt.* 2004. V. 43, N 18. P. 3708–3716.
7. *Dessenne C., Madec P.Y., Rousset G.* Modal prediction for closed-loop adaptive optics // *Opt. Lett.* 1997. V. 22, N 20. P. 1535–1537.
8. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
9. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
10. *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. Т. 17, № 12. С. 129–133.
11. *Gamal High A.El.* Dynamic Range Image Sensors. Department of Electrical Engineering Stanford Univer. URL: http://isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_publications/isscc02_tutorial.pdf
12. *Тейлор Дж.* Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.
13. *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 атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 1. С. 75–80.
14. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П.* Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11, № 11. С. 1219–1223.
15. *Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Туев М.В.* Особенности опережающей коррекции турбулентных искажений по измерениям датчика Шэка—Гартмана // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 11. С. 1042–1047.
16. *Федосов Б.Т.* Прогнозирование, анализ, синтез и моделирование сигналов управления. URL: http://model.exponenta.ru/bt/bt_0005.html#L05

L.V. Antoshkin, V.V. Lavrinov, L.N. Lavrinova, V.P. Lukin. Methods of forestalling formation of the phase surface on the basis of measurements with the Shack—Hartmann sensor.

The adaptive system provides the correction of turbulent distortions, which have been defined during the previous moment of time, but changes to the time of their correction by the system. The forestalling adaptive correction allows setting the surface profile of a working mirror corresponding to the wave front on the entrance aperture of adaptive system for the future moment of time on the basis of last measurement of the Shack—Hartmann wave front sensor. Ways of forestalling formation of the profile of the correcting mirror are presented.