

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА**

УДК 550.388.2; 554.510.535

**СТЕНД СЛЕДЯЩЕЙ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
С КОНТУРОМ ОПРЕЖАЮЩЕЙ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ  
ВОЛНОВОГО ФРОНТА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

©2026 г. Л. Н. Лавринова<sup>а\*</sup>, В. В. Лавринов<sup>а</sup>, Л. В. Антошкин<sup>а</sup>

*<sup>а</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения*

*Российской академии наук*

*Россия, 634055, Томск, пл. Академика Зуева, 1*

*\*e-mail: lnl@iao.ru*

Поступила в редакцию 18.09.2025 г.

После доработки 02.10.2025 г.

Принята к публикации 30.10.2025 г.

Предложен способ повышения разрешающей способности и быстродействия адаптивных оптических систем, предназначенных для коррекции углов наклона волнового фронта оптического излучения в астрономии, системах видения в турбулентной атмосфере, управлении лазерным лучом в сканирующих системах и системах оптической связи. На стенде следящей адаптивной оптической системы способ реализуется путем опережающей установки угла наклона Tip-Tilt-зеркала дополнительного корректирующего дефлектора в положение, при котором суммарный угол наклона Tip-Tilt-зеркал обоих (стабилизирующего и дополнительного корректирующего) дефлекторов будет соответствовать углу наклона волнового фронта на входной апертуре системы на момент регистрации следующего кадра. Рассмотрены подходы к вычислению прогнозируемых значений углов наклона волнового фронта, в том числе посредством применения искусственных нейронных сетей.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Следящая адаптивная оптическая система компенсирует обусловленные атмосферной турбулентностью случайные угловые смещения энергетического центра тяжести (ЭЦТ) оптического излучения в плоскости регистрации [1–4] или устраняет случайные углы наклона волнового фронта оптического пучка.

Tip-Tilt-зеркало, описанное в работе [4], обрабатывает в реальном времени сигналы управления, которые пропорциональны угловым смещениям ЭЦТ изображения оптического излучения в плоскости его регистрации.

При регистрации очередного кадра наклон следящего корректирующего Tip–Tilt-зеркала за счет постоянного механического запаздывания устанавливается с задержкой по времени относительно корректируемых параметров, что в условиях турбулентной атмосферы снижает точность и качество адаптивно-фазовой коррекции в целом.

Получить изображение оптического излучения в фокальной плоскости системы без временной задержки на момент регистрации позволяет установка наклонов дополнительного корректирующего Tip–Tilt-зеркала в положение, соответствующее углам наклона волнового фронта оптического пучка на момент следующего кадра посредством опережающего формирования наклона, который отрабатывается дополнительным корректирующим Tip–Tilt-зеркалом. Точнее сказать, на Tip–Tilt-зеркало подается сигнал управления, рассчитанный таким образом, чтобы на нем сформировался наклон, соответствующий углу наклона волнового фронта оптического пучка, который приходит на входную апертуру системы именно в этот момент времени.

Поэтому на стенде адаптивной оптической системы, представленном на рис. 1, контур стабилизации излучения дополнен контуром опережающей коррекции наклонов волнового фронта оптического излучения, что улучшает работу программно-аппаратного комплекса [4].

**Рис. 1.** Внешний вид стенда адаптивной оптической системы...

## 2. СЛЕДЯЩАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С КОНТУРОМ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ КОРРЕКЦИИ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ

Способ опережающей коррекции в оптической следящей системе с контуром, содержащим объектив, видеокамеру, блок управления по координатам  $x$ ,  $y$ , Tip–Tilt-зеркало и блок управления зеркалом [4], характеризуется тем, что добавлены светоделительный кубик, контур с Tip–Tilt-зеркалом и видеокамерой слежения, причем для видеокамер и поворота обоих Tip–Tilt-зеркал направления осей в системе координат  $x$ ,  $y$  полностью совпадают.

Принимаемое видеокамерой в контуре слежения изображение наблюдаемого пучка, прошедшего на входную апертуру системы, регистрируется равномерными кадрами, по которым рассчитываются координаты ЭЦТ изображения, регистрируемого матрицей видеокамеры в контуре слежения. Координаты запоминаются в регистре сдвига координат ЭЦТ изображения пучка блоком управления системы. По ним относительно нулевых

координат на матрице видеокамеры слежения рассчитываются перемещение наблюдаемого пучка и изменение углов наклона волнового фронта в турбулентной атмосфере.

Рассчитанный сигнал поступает на Tip-Tilt-зеркало контура слежения, где устанавливается угол поворота Tip-Tilt-зеркала. Сигнал компенсирует смещение изображения на светочувствительной матрице в последнем кадре по координатам ЭЦТ изображения, определенным за последние  $N$  кадров, хранящихся в регистре сдвига.

По этим кадрам рассчитывается ожидаемое положение изображения пучка в будущем кадре. Устанавливается угол наклона корректирующего Tip-Tilt-зеркала так, чтобы положение изображения в будущем кадре совпало с положением изображения на матрице видеокамеры контроля в предыдущих кадрах.

На рис. 2 представлена схема следящей оптической системы с контуром опережающей коррекции.

**Рис. 2.** Схема следящей оптической системы с контуром опережающей коррекции наклонов волнового фронта излучения

Оптическое излучение проходит через объектив 1, отражается от следящего Tip-Tilt-зеркала 2 контура стабилизации, проходит через светоделительный кубик 4 и фокусируется на светочувствительной матрице видеокамеры 5, где регистрируется текущее положение стабилизируемого изображения излучения.

Координаты ЭЦТ изображения излучения запоминаются в регистре блока управления устройством 6, где вычисляются управляющие воздействия, поступающие в регистр сдвига и на блок управления 3 Tip-Tilt-зеркалом 2, который корректирует отклонение пучка в контуре стабилизации.

По координатам ЭЦТ изображений излучения трех (четырёх, пяти) последних кадров, сохраненных в сдвиговом регистре блока управления 6, посредством определения координат ЭЦТ изображения оптического пучка в плоскости регистрации аналитическим методом или с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) рассчитываются управляющие сигналы, поступающие через блок управления 10 и через масштабирующее устройство 8 на Tip-Tilt-зеркало 7 контура опережающей коррекции и на видеокамеру контроля 9.

После стабилизации излучения на светочувствительной матрице видеокамеры Tip-Tilt-зеркало осуществляет коррекцию угловых координат ЭЦТ изображения излучения в фокальной плоскости видеокамеры контура опережающей коррекции с компенсацией ошибки, вызванной временной задержкой в контуре стабилизации. Таким образом, в момент регистрации каждого кадра видеокамерой контура опережающей коррекции

суммарные углы наклона последовательно установленных Tip–Tilt-зеркал равны углам наклона волнового фронта на входной апертуре системы в противофазе (т.е. со знаком минус), что обеспечивает точность регистрации принимаемого изображения излучения в фокальной плоскости системы без отставания во времени.

### 3. АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КООРДИНАТЫ ЭЦТ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПУЧКА В ПЛОСКОСТИ РЕГИСТРАЦИИ

Опережающая адаптивная коррекция наклонов волнового фронта оптического излучения заключается в опережающем формировании наклонов, обрабатываемых зеркалом, она может быть реализована с применением аналитического подхода, например разложения функции в ряд Тейлора.

Распространение оптического излучения через атмосферу сопровождается изменением наклонов волнового фронта под влиянием атмосферной турбулентности и представляет собой случайный процесс.

Распределение интенсивности в плоскости регистрации соответствует изображению оптического пучка на светочувствительной матрице видеокамеры, которое содержит фокальное пятно с характерным профилем в заданный момент времени и координатами ЭЦТ изображения пучка, выраженными в момент времени  $t$  через взвешенные интенсивности пикселей  $I_{ij}(t)$ , нормированные на интегральную интенсивность двумерного распределения интенсивности:

$$\xi(t) = \frac{\sum_{i=1}^N i \sum_{j=1}^N I_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_{ij}(t)},$$

$$\eta(t) = \frac{\sum_{j=1}^N j \sum_{i=1}^N I_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_{ij}(t)}.$$
(1)

Углы наклона волнового фронта излучения пропорциональны смещениям ЭЦТ фокальных пятен в плоскости регистрации, они могут быть выражены через разности их координат относительно координат опорного волнового фронта (например, плоского):

$$\alpha(t) = \frac{1}{f} (\xi(t) - \xi_0(t)) = \frac{1}{f} \Delta \xi(t), \quad \beta(t) = \frac{1}{f} (\eta(t) - \eta_0(t)) = \frac{1}{f} \Delta \eta(t),$$

где  $f$  – фокусное расстояние.

Пусть траектория движения ЭЦТ изображения пучка в плоскости регистрации, например по координате  $\xi$ , представлена случайной функцией  $S(t)$ .

Для анализа траектории изменения координаты  $\xi$  можно применить разложение функции  $S(t)$  в ряд Тейлора [5], согласно которому функция  $S(t)$  может быть представлена

взвешенной суммой простых стандартных степенных сигналов вида  $t^q$ . Значения сигнала для последующих моментов времени определяются как сумма исходного значения сигнала и его приращений, обусловленных скоростью  $S'(t)$ , ускорением  $S''(t)$ , рывком  $S'''(t)$  и производными по времени более высокого порядка.

Таким образом, траектория движения ЭЦТ изображения пучка  $S(t)$  в окрестности точки  $\tau$  может быть представлена в виде [5]

$$S(t) = P_n(t) + R_n(t), \quad (2)$$

где выражение

$$P_n(t) = S(\tau) + S'(\tau) \cdot (t + \tau)/1! + S''(\tau) \cdot (t + \tau)^2/2! + S^{(n-1)}(\tau) \cdot (t + \tau)^{n-1}/(n-1)!$$

представляет собой разложение функции  $S(t)$  по положительным степеням двучлена  $t + \tau$  в ряд Тейлора; в обобщенном виде

$$P_n(t) = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{S^{(m)}(\tau)}{m!} (t + \tau)^m.$$

При вычислении значений функции с заданной точностью, т.е. при допущении, что приращение  $\Delta t$  совпадает с временем между кадрами и что для любого  $t$  существует точка  $t + \tau$ , лежащая между  $t$  и  $t + \Delta t$ , в которой выполняется разложение функции  $S(t)$  в ряд Тейлора (2), может быть применен остаточный член в форме Лагранжа [5]:

$$R_n(t) = \frac{S^{(n)}(\tau + \theta(t + \tau))}{n!} (t + \tau)^n, \quad 0 < \theta(t + \tau) < 1.$$

На рис. 3 приведена иллюстрация механизма вычисления приращения по одной из координат ЭЦТ изображения пучка, где кривая представляет изменение координаты ЭЦТ  $\xi$  во времени.

**Рис. 3.** Определение координаты ЭЦТ изображения пучка в плоскости регистрации  $\xi$  в момент времени  $t + 1$  по его координатам в моменты времени  $t - 3, t - 2, t - 1$  и  $t$

Приращение  $\Delta t$  при вычислении производной совпадает с временем между кадрами, приращение по координате  $\xi$  может быть представлено выражением  $\Delta \xi_t = \xi_t - \xi_{t-1}$ , и на рис. 3 оно соответствует отрезку  $BD$ . Координата  $\xi$  в момент времени  $t - 1$  в точке  $C$  обозначена как  $\xi_{t-1}$ . Координата  $\xi_t$  соответствует точке  $A$ . Прямая  $AC$  является касательной к функции  $S(t)$  в точке  $A$ , тогда значение функции  $S(t)$  в момент  $t + 1$  выражается как

$$AE = BL = \left( \frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t.$$

Величина  $\Delta \xi_t / \Delta t$  определяет скорость изменения координаты  $\xi$  от момента времени  $t - 1$  до момента  $t$  и соответствует отрезку  $BL$ . Отношение приращений  $\Delta \xi_{t-1} / \Delta t$  определяет

скорость изменения координаты  $\xi$  от момента времени  $t - 2$  до момента  $t - 1$  и соответствует отрезку  $BF$ .

Прямая  $AF$  параллельна прямой  $GN$ . Изменение скорости смещения координаты ЭЦТ изображения пучка от момента времени  $t - 2$  до момента  $t$  может быть записано как

$$\left( \frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} - \frac{\Delta \xi_{t-1}}{\Delta t} \right) \Delta t,$$

оно соответствует отрезку  $LF$  и является ускорением, с которым меняется скорость изменения координаты  $\xi$ .

Прямая  $AW$  параллельна прямой  $PU$ . Изменение ускорения смещения координаты ЭЦТ изображения пучка от момента времени  $t - 3$  до момента  $t$ , где  $\Delta \xi_{t-2} = \xi_{t-2} - \xi_{t-3}$ , может быть записано в виде

$$\left[ \left( \frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} - \frac{\Delta \xi_{t-1}}{\Delta t} \right) \Delta t - \left( \frac{\Delta \xi_{t-1}}{\Delta t} - \frac{\Delta \xi_{t-2}}{\Delta t} \right) \Delta t \right] \Delta t,$$

оно соответствует отрезку  $LW$  и является рывком, с которым меняется ускорение изменения координаты  $\xi$ .

Пунктирная линия, соответствующая прямой  $AV$  на рис. 3, обозначает значения прогнозируемой величины при различных значениях  $t$ .

Вычисление прогнозируемого значения  $\xi_{t+1}$  через разложение траектории движения координаты ЭЦТ  $\xi$  изображения пучка в ряд Тейлора по первой и второй производным с остаточным членом представлено на рис. 4а; по первой, второй и третьей производным с остаточным членом – на рис. 4б; по первой, второй, третьей и четвертой производным с остаточным членом – на рис. 4в.

**Рис. 4.** Схемы вычисления координаты ЭЦТ изображения пучка  $\xi$  в момент времени  $t + 1$  через разложение траектории движения координаты ЭЦТ изображения пучка в ряд

Прогнозируемое значение координаты  $\eta_{t+1}$  может быть получено аналогичным образом.

На рис. 5 приведены сегменты из выборок наклонов  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\beta(t)\}$  длиной 1000 значений, эмулируемых на стенде (рис. 1) с частотой 500 Гц (ряд 1). Таким образом, величина прогноза  $\Delta t$  на временной шкале составляет два отсчета. Выборки наклонов  $\{\alpha(t + \Delta t)\}$  и  $\{\beta(t + \Delta t)\}$  представляют значения наклонов в момент  $t + \Delta t$  (ряд 5), т.е. они получены с постоянным запаздыванием. Значения наклонов, рассчитанных из выборок  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\beta(t)\}$  по формулам (2), изображены в виде ряда 2 (по первой и второй производным), ряда 3 (по первой, второй и третьей производным) и ряда 4 (по первой, второй, третьей и четвертой производным).

**Рис. 5.** Сегменты из выборок наклонов  $\{\alpha(t)\}$  (а) и  $\{\beta(t)\}$  (б) длиной 1000 значений каждая,

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона  $r$  [5] выявил следующую связь между выборками наклонов волнового фронта: коэффициент корреляции между  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\alpha(t + \Delta t)\}$  составил 0.045; между  $\{\beta(t)\}$  и  $\{\beta(t + \Delta t)\}$  был равен 0.127.

Пусть  $\{\alpha_S(t)\}$  и  $\{\beta_S(t)\}$  – выборки наклонов, полученные из выборок  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\beta(t)\}$  на основе опережающей коррекции по схемам, представленным на рис. 4. Корреляция между выборками  $\{\alpha(t + \Delta t)\}$  и  $\{\alpha_S(t)\}$  практически характеризует статистически значимую связь: 0.844 (по первой и второй производным), 0.831 (по первой, второй и третьей производным) и 0.820 (по первой, второй, третьей и четвертой производным). Между выборками  $\{\beta(t + \Delta t)\}$  и  $\{\beta_S(t)\}$ : 0.723; 0.721; 0.716 соответственно. При этом корреляция между выборками  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\alpha_S(t)\}$  не достигает статистической значимости: 0.5, 0.485, 0.49. Коэффициент корреляции между выборками  $\{\beta(t)\}$  и  $\{\beta_S(t)\}$  составляет 0.557, 0.541, 0.542.

Корреляционный анализ показывает достаточную результативность опережающего формирования углов наклона на основе анализа траекторий движения координат ЭЦТ изображения пучка в плоскости регистрации посредством разложения их в ряд Тейлора.

#### 4. ОПЕРЕЖАЮЩЕЕ ФОРМИРОВАНИЕ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В ПЛОСКОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНС

Способности ИНС к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными мотивируют их использование для опережающей установки наклонов волнового фронта в случае стабилизации оптического излучения на стенде адаптивной оптической системы [4], т. е. вычисление прогнозируемых в момент времени  $t + \Delta t$  значений координат  $\xi_{t+\Delta t}$  и  $\eta_{t+\Delta t}$  на основе ИНС.

Для вычисления прогнозируемых значений координат ЭЦТ изображения пучка на основе ИНС в качестве входных параметров служат выборки углов наклона  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\beta(t)\}$ . Углам наклона пропорциональны смещения ЭЦТ изображения пучка в плоскости регистрации в виде разностей измеренных координат  $\xi$  относительно опорных  $\xi_0$ , например, в моменты времени  $t, t - 1, t - 2$  (рис. 4а);  $t, t - 1, t - 2, t - 3$  (рис. 4б);  $t, t - 1, t - 2, t - 3, t - 4$  (рис. 4в). Коэффициенты, указанные на рис. 4 для разложения в ряд Тейлора, могут служить целевыми значениями весов в реализации многослойной нейронной сети.

Алгоритм обучения нейронной сети при прогнозировании изменения значений исследуемой функции, реализуемый ИНС, построенной по правилу многослойного персептрона, подробно представлен в работе [6].

Наиболее приемлемым вариантом обучения в данном случае является градиентный метод поиска минимума функции ошибки с рассмотрением сигналов ошибки от выходов ИНС к ее входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы [6, 7]. Выходные значения ИНС сравниваются с целевыми значениями, и вычисляется ошибка. Функция ошибки представляет собой квадрат рассогласования (ошибки) желаемого выхода сети и реального.

При вычислении элементов вектора-градиента используются производные функции активации сигмоидального типа [8]:

$$o = o(w^T x) = \frac{1}{1+e^{-w^T x}},$$

где  $x^T = (x_1, \dots, x_m)$  – вектор входных сигналов;  $w^T = (w_1, \dots, w_m)$  – вектор весов сети,  $T$  – символ транспонирования. Начальные значения весов  $w_i$  выбираются случайным образом.

Если выборка для обучения сети задаётся формулами

$$x^1 = (x_1^1, \dots, x_m^1)^T, \quad y^1,$$

$$x^2 = (x_1^2, \dots, x_m^2)^T, \quad y^2,$$

.....

$$x^M = (x_1^M, \dots, x_m^M)^T, \quad y^M,$$

где  $y$  – значение желаемого выхода, и функция ошибки выражается формулой

$$E = \frac{1}{2} \left( y - \frac{1}{1+e^{-w^T x}} \right)^2,$$

то обучение сети сводится к подбору такого вектора  $w$ , при котором достигается минимум ошибки  $E$  посредством градиентного метода:  $w = w - \beta E'(w)$ , где  $E'(w)$  – вектор-градиент,  $\beta$  – константа.

Значение ошибки, а также градиента поверхности ошибок используется для корректировки весов  $w_i$ , после чего все действия повторяются. Процесс обучения прекращается, когда ошибка достигнет некоторого порогового уровня. Алгоритм, реализующий процесс обучения ИНС (рис. 6), действует итеративно, итерацию принято называть эпохой.

**Рис. 6.** Иллюстрация процесса обучения ИНС.

В каждой эпохе на вход ИНС поочередно подаются все обучающие наблюдения в виде выборки углов наклона  $\{\alpha(t)\}$ , где варьируется количество кадров (тренд). Аналогичным образом формируются ИНС для выборки  $\{\beta(t)\}$ .

Входные данные для ИНС (в нашем случае с двумя скрытыми слоями) являются обучающей выборкой и контрольной выборкой. Именно от состава, полноты и качества обучающей выборки существенно зависят время обучения ИНС и достоверность получаемых результатов.

В качестве обучающих выборок выступают записи наклонов  $\{\alpha(t)\}$  и  $\{\beta(t)\}$  длиной 500 значений каждая. Необходимо найти оптимальные размеры обучающей выборки и тренда.

Сначала ИНС обучалась 25-кадровым набором с размером тренда в один кадр. После обучения ИНС (если оно состоялось) проверялась ее способность к прогнозу на контрольной выборке и вычислялся коэффициент корреляции. Затем увеличивалось количество кадров обучающей выборки с шагом 25 кадров. Такое увеличение идет до 475 кадров, чтобы оставалось 25 кадров на проверку. По достижении размера обучающей выборки 475 кадров увеличивался размер тренда на 1 кадр, затем обучение опять начиналось с обучающей выборкой в 25 кадров. Результатом такого эксперимента является подбор длины обучающей выборки из 400 кадров и размера тренда из 4 кадров (рис. 7).

**Рис. 7.** Зависимость коэффициента корреляции: от размера обучающей выборки  $\{\alpha(t)\}$  (а) и  $\{\beta(t)\}$  (б) при тренде размером 4 кадра;

В условиях высокоинтенсивной атмосферной турбулентности изображение излучения в плоскости регистрации становится нечетким, расплывчатым, профиль распределения интенсивности структурированным и построение прогноза почти невозможно [9]. Поэтому в качестве оценки, допускающей построение прогноза при наличии высокоинтенсивной турбулентности, следует принять максимальный размер области, в пределах которой выполняется смещение ЭЦТ изображения излучения без ошибки, обусловленной временной задержкой системы.

Если в плоскости регистрации отсутствует фокальное пятно, то следует оценивать произведение регистрируемого распределения интенсивности  $I_{ij}(t)$  и двумерного распределения Гаусса  $I_{ij}^g(t)$  в качестве весовой функции в пределах области, определяемой дисперсией  $\sigma^2 = 1/2$  для стандартного нормального распределения Гаусса [5] (рис. 8).

**Рис. 8.** Профили, проходящие через середину регистрируемого структурированного распределения интенсивности  $I_{ij}(t)$ ...

Таким образом, максимальный размер области для построения прогноза составляет  $(N/3) \times (N/3)$ , где  $N \times N$  – размерность распределения интенсивности в плоскости регистрации изображения излучения.

Нейронная сеть может учиться только на распределениях интенсивности, в которых ЭЦТ относительно центра распределения движется преимущественно в пределах области размером  $N/3$  на  $N/3$ , а количество фокальных пятен, выходящих за ее пределы, не превышает 50–75 на обучаемую выборку из 400 кадров.

В ходе определения количества кадров в обучающей выборке и размера тренда было выявлено, что нейронная сеть способна обучаться и строить прогноз по обучающей выборке размером, превышающим десять кадров, при указанных диапазонах смещений ЭЦТ изображения излучения.

С учетом границ области определения координат ЭЦТ изображения пучка в плоскости регистрации эффективность ИНС оценивается метрикой, которая характеризует долю правильно классифицированных положительных результатов относительно всех положительных результатов входных данных отношением  $N_{tp}/(N_{tp} + N_{fp})$ , где  $N_{tp}$  – число истинно положительных распознаваний выборки,  $N_{fp}$  – число ложно положительных распознаваний, значение этой метрики составляет более 90%.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптивная оптическая система, предназначенная для уменьшения размытости изображения или повышения его разрешения, является сегодня важнейшим инструментом любой обсерватории, обладает уникальностью, которая обусловлена особенностями атмосферной турбулентности в местах расположения телескопов, построенных высоко в горах, где отсутствуют самые плотные слои атмосферы.

В Европейской южной обсерватории (ESO) в составе очень Большого телескопа VLT (Very Large Telescope) проблемами устранения турбулентных искажений оптического излучения занимается отдел адаптивной оптики (Adaptive Optics Facility) [10]. Особое внимание уделяется вопросу недостаточного быстродействия адаптивной оптической системы, характеризующейся конечным временем срабатывания [11].

Адаптивная оптическая система, реализованная на стенде [4], также представляет собой динамическую систему с постоянным запаздыванием. Применяв различные схемы статистического прогнозирования случайных значений углов наклона, пропорциональных смещениям ЭЦТ изображения излучения в плоскости регистрации с представлением

траектории движения координат ЭЦТ изображения в виде непрерывной в точке функции, мы получили оценку улучшения качества стабилизации оптического излучения в системе с прогнозом по сравнению с системой постоянного запаздывания.

Показано, что качество стабилизации оптического излучения на основе анализа траектории движения координат ЭЦТ изображения излучения подтверждается статистической значимостью результатов сравнения выборок из эмулируемых углов наклона [4] и выборок из рассчитанных углов наклона с учетом их опережающей установки.

Оценивание среднеквадратической ошибки вычисления координаты ЭЦТ изображения излучения в зависимости от поперечной составляющей скорости ветра, т.е. времени между анализируемыми кадрами, показало, что для сигнала со спектром, содержащим средние и низкие пространственные частоты (при скорости ветра 0.25 м/с), опережающая установка углов наклона волнового фронта как аналитическими методами (рис. 4), так и с использованием ИНС при расчете сигналов обработки системой дает ошибку, которая примерно в 1.5 раза меньше ошибки в случае системы постоянного запаздывания. Ошибка уменьшается более чем в 4 раза при поперечной составляющей скорости ветра 1 м/с.

Прогнозирование посредством анализа траектории движения координат ЭЦТ изображения излучения в плоскости регистрации как аналитическим методом, так и с использованием ИНС в задачах опережающей установки углов наклона волнового фронта на стенде адаптивной оптической системы характеризуется отсутствием необходимости знания статистических данных о турбулентности [12, 13].

Однако имеет место ограничение, обусловленное интенсивностью фазовых искажений излучения.

Показано, что в условиях высокоинтенсивной атмосферной турбулентности для реализации прогнозирования максимальный размер области должен составлять треть от размерности распределения интенсивности. При использовании ИНС количество фокальных пятен, выходящих за фиксированную область, не должно превышать 50–75 на обучаемую выборку в 400 кадров.

Улучшить качество стабилизации оптического излучения на стенде адаптивной оптической системы [4] рекомендуется применением контура опережающей коррекции, что подтверждено полученным Патентом РФ на техническую реализацию следящей адаптивной оптической системы с контуром опережающей коррекции [14].

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. Москва: Техносфера, 2013.
2. Боршевников А.Н., Дементьев Д.А., Леонов Е.В., Ляхов Д.М., Сохарева Г.Н., Черных А.В., Шанин Ю.И., Щипалкин В.И. // Автометрия. 2018. Т. 54. № 3. С. 119. <https://doi.org/10.15372/AUT20180315>
3. Бокало С.Ю., Бокашов И.М., Ляхов Д.М., Пикулев С.В., Черных А.В. // Автометрия. 2018. Т. 54. № 1. С. 54. <https://doi.org/10.15372/AUT20180108>
4. Лавринов В.В., Антошкин Л.В., Лавринова Л.Н., Селин А.А. // ПТЭ. 2025. № 1. С. 99.
5. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. Москва: Наука. 1978.
6. Кропотов Ю.А., Проскуряков А.Ю., Белов А.А. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 6. С. 1093. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36807099>
7. Щербаков А.П. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 11. С. 897. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79696601> .
8. Мальшиев А.Н., Данилов Е.А. // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3 (часть 2). С. 39.
9. Montera D.A., Welsh B.M., Roggemann M.C., Ruck D.W. // Appl. Opt. 1997. V. 36. № 3. P. 675. <https://doi.org/10.1364/ao.36.000675>
10. Madec. P.-Y. // COAT-2019-workshop. (Communications and Observations through Atmospheric Turbulence: characterization and mitigation), ONERA, Châtillon, France, 2019. <https://doi.org/10.34693/COAT2019-S3-001>
11. Dessenne C., Madec P.Y., Rousset G. // Opt. Lett. 1999. V. 24. № 5. P. 339. <https://doi.org/10.1364/OL.24.000339>
12. Ягнятинский Д.А., Федосеев В.Н., Шепелев А.В. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 4. С. 316. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65658230> .
13. Старченко А.В., Дель И.В., Одинцов С.Л. // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 3. С. 225. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=64897101>
14. Антошкин Л.В., Лавринова Л.Н., Лавринов В.В. РФ Патент 2799987, 2023.

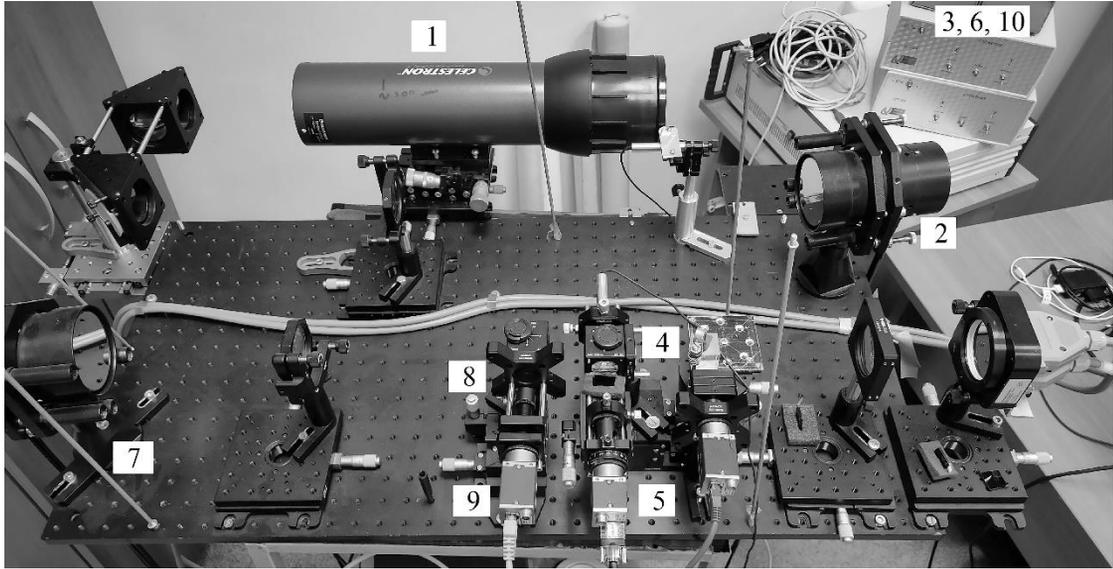
## **STAND OF TRACKING ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM WITH CONTOUR OF PRIOR CORRECTION OF OPTICAL RADIATION WAVEFRONT TILT**

A method for increasing the resolution and response time of adaptive optical systems designed to correct wavefront tilt angles for optical radiation in astronomy, turbulent atmosphere vision systems, laser beam control in scanning systems, and optical communications systems is proposed. On a tracking adaptive optical system setup, the method is implemented by presetting the tip-tilt angle of the additional correcting deflector mirror to a position at which the combined tip-tilt angle of both deflectors (stabilizing and additional correcting) corresponds to the wavefront tilt angle at the system's input aperture at the time of recording the next frame. Approaches to calculating predicted wavefront tilt angles, including the use of an artificial neural network, are considered.

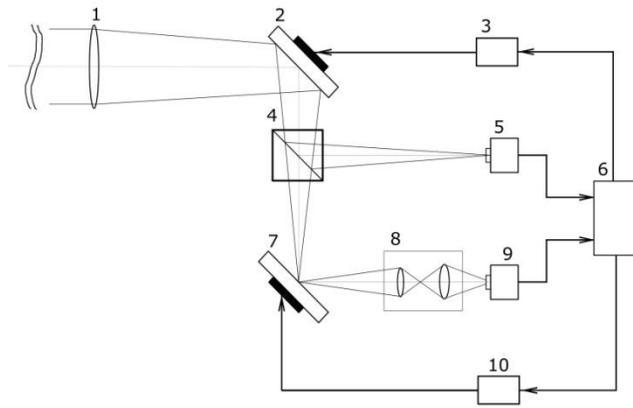
*Keywords:* adaptive optics system, wavefront tilt, turbulence

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Внешний вид стенда адаптивной оптической системы: 1 – телескопическая система, 2 – корректирующее Tip–Tilt-зеркало, 4 – светоделительный кубик, 5 – видеокамера датчика наклонов, 7 – Tip–Tilt-зеркало контура опережающей коррекции, 8 – масштабирующее устройство, 9 – видеокамера контроля; 3, 6, 10 – блоки управления Tip–Tilt-зеркалами.
- Рис. 2.** Схема следящей оптической системы с контуром опережающей коррекции наклонов волнового фронта излучения.
- Рис. 3.** Определение координаты ЭЦТ изображения пучка в плоскости регистрации  $\xi$  в момент времени  $t+1$  по его координатам в моменты времени  $t-3$ ,  $t-2$ ,  $t-1$  и  $t$ .
- Рис. 4.** Схемы вычисления координаты ЭЦТ изображения пучка  $\xi$  в момент времени  $t+1$  через разложение траектории движения координаты ЭЦТ изображения пучка в ряд Тейлора с числом слагаемых 3 (а), 4 (б) и 5 (в).
- Рис. 5.** Сегменты из выборок наклонов  $\{\alpha(t)\}$  (а) и  $\{\beta(t)\}$  (б) длиной 1000 значений каждая, эмулируемых на стенде (рис. 1) с частотой 500 Гц, изображены в виде ряда 1; ряд 5 соответствует выборкам  $\{\alpha(t+\Delta t)\}$  и  $\{\beta(t+\Delta t)\}$ ; ряды 2–4 представляют собой наклоны, рассчитанные на основе опережающей коррекции по схемам на рис. 4.
- Рис. 6.** Иллюстрация процесса обучения ИНС.
- Рис. 7.** Зависимость коэффициента корреляции от размера обучающей выборки ( $N_{\text{sqn}}$ ), где  $\{\alpha(t)\}$  (а) и  $\{\beta(t)\}$  (б) при тренде размером 4 кадра, и от размера тренда ( $N_{\text{trd}}$ ) при обучающей выборке из 400 кадров (в).
- Рис. 8.** Профили, проходящие через середину регистрируемого структурированного распределения интенсивности  $I_{ij}(t)$  (кривая 1), кривая 2 соответствует гауссову распределению  $I_{ij}^g(t)$  в качестве весовой функции, кривая 3 – произведению распределений  $I_{ij}(t)$  и  $I_{ij}^g(t)$ , кривая 4 – удвоенному произведению распределений  $I_{ij}(t)$  и  $I_{ij}^g(t)$ .

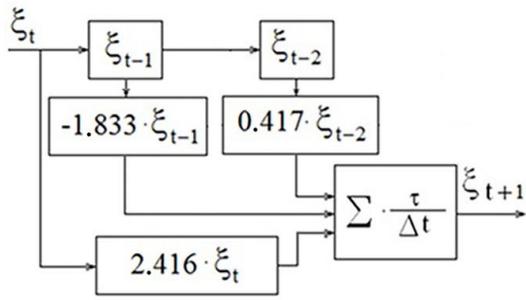


**Рис. 1.**

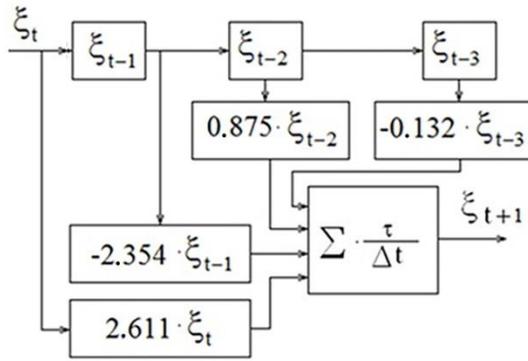


**Рис. 2.**

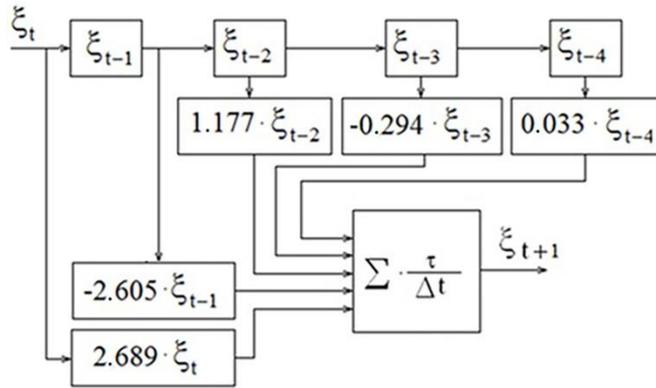




(a)



(б)



(B)

Рис. 4.

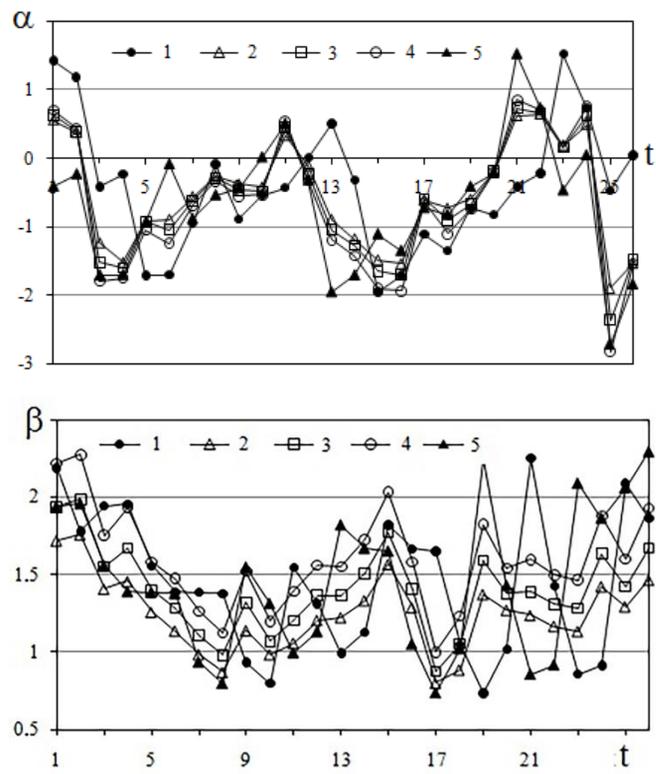
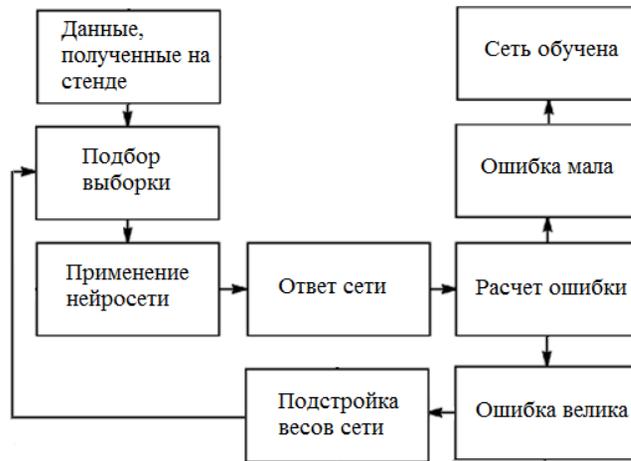


Рис. 5.



**Рис. 6.**

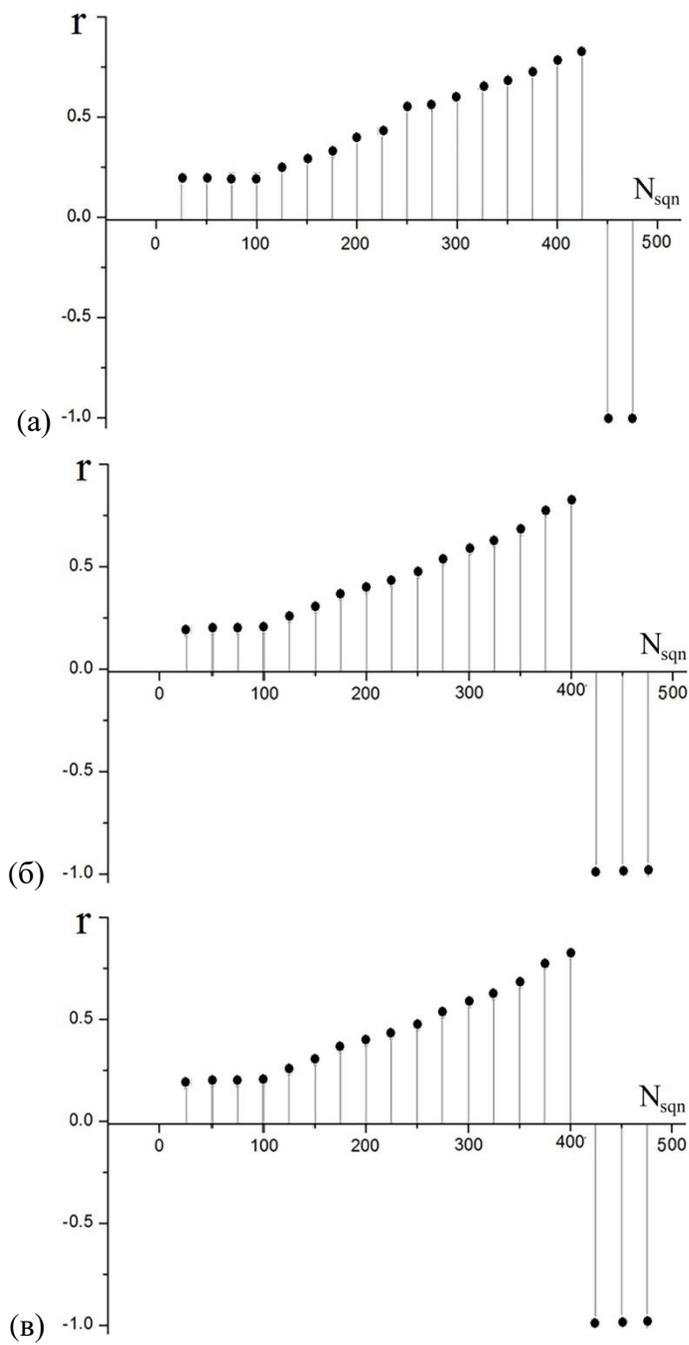


Рис. 7.

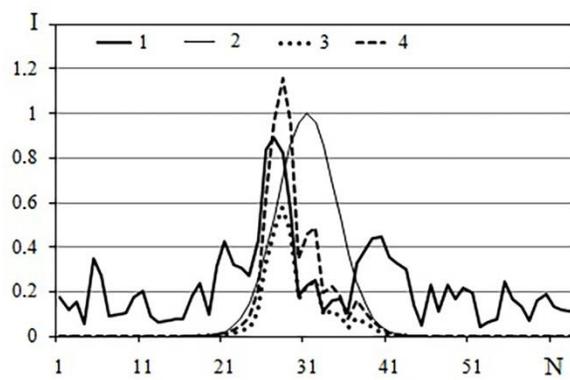


Рис. 8.