

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 550.388.2; 554.510.535

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОТЯЖЁННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ТРАССАХ

© В. В. Лавринов, Л. В. Антошкин, Л. Н. Лавринова, А. А. Селин

*Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН,
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
E-mail: lvv@iao.ru*

Представлена адаптивная оптическая система для коррекции искажений лазерного излучения на протяжённой атмосферной трассе в режиме реального времени, которая включает в себя блок эмуляции атмосферной турбулентности и контур опережающей коррекции обусловленных запаздыванием корректирующего зеркала Tip-Tilt ошибок углов наклона лазерного пучка. Алгоритмы опережающей коррекции протестированы на основе численного анализа измерений, выполненных датчиком волнового фронта Шэка — Гартмана.

Ключевые слова: оптоэлектронные системы, углы наклона волнового фронта, оптическая связь.

DOI: 10.15372/AUT20240609

EDN: BFLNZC

Введение. Адаптивные оптические системы могут быть использованы не только как инструментарий для астрономических обсерваторий, но и как отдельные оптоэлектронные системы. Такие системы создаются для работы на приземных горизонтальных или наклонных атмосферных трассах и могут найти применение в системах связи, дальнего видения, фокусировки излучения на удалённых объектах и слежения за воздушно-космическими объектами.

На текущий момент не существует специальной статистической модели, описывающей атмосферную турбулентность для горизонтальной атмосферной трассы, в отличие от теории турбулентности, которая применяется в адаптивных оптических системах, установленных на астрономических телескопах. Теория атмосферной турбулентности, разработанная для вертикальных трасс Д. Л. Фридом, Ф. Родье и рядом других учёных [1–4], обычно без изменений переносится на исследования распространения лазерного излучения на горизонтальных атмосферных трассах.

Построение эффективно работающей адаптивной оптической системы даже с учётом высокого уровня развития науки является нетривиальной задачей [5], особенно в случае её применения на горизонтальных трассах. Такая система должна учитывать достаточно быстрые изменения атмосферной турбулентности для решения широкого спектра проблем, связанных с компенсацией искажений лазерного излучения.

Одним из способов повышения эффективности работы адаптивных оптических систем на горизонтальных трассах является увеличение их быстродействия, что недостижимо без усовершенствования как элементной базы адаптивной оптики, так и методологии создания самой адаптивной оптической системы, разработки алгоритмов управления и оценивания качества работы адаптивной системы в целом и её компонент в частности. Работы в этом направлении активно ведутся [6–9].

Современная адаптивная оптическая система включает в себя контур коррекции наклонов. Для коррекции наклонов или систем автоматической калибровки оптической части могут быть использованы корректоры Tip-Tilt [10–12]. В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН для стабилизации изображения, сформированного лазерным излучением в плоскости регистрации, был создан корректор углов наклона волнового фронта [13].

Цель данной работы — повышение эффективности адаптивных оптических систем на горизонтальных трассах, увеличение их быстродействия путём включения в двухконтурную следящую адаптивную оптическую систему дополнительных блока эмуляции атмосферной турбулентности с возможностью её повторного воспроизведения и блока, реализующего опережающую коррекцию для решения проблемы задержки в контуре коррекции наклонов.

Для достижения этого был создан стенд адаптивной оптической системы.

Стенд адаптивной оптической системы. Для получения точечного источника в случае адаптивной оптической системы, представленной в данной работе, решено использовать зеркально-линзовый отражатель, расположенный на достаточно большом расстоянии от входной апертуры адаптивной системы.

Возможность применения зеркально-линзового отражателя подтверждена в [14], где для калибровки датчика волнового фронта был применён сферический источник. Зеркально-линзовый отражатель может быть использован в системах оптической связи, мониторинга состояния атмосферы и очагов возгорания (так как нагрев окружающей среды порождает восходящие турбулентные потоки) и в системах противодействия БПЛА.

В нашем случае расходящийся точечный источник помещается на расстоянии, превышающем фокусное расстояние в 5000 раз, поэтому сферический фронт можно считать плоским, что позволяет сделать вывод о возможности использования зеркально-линзовых отражателей в качестве источников опорных сигналов.

Зеркально-линзовый отражатель представляет собой оптическое устройство, состоящее из плоского зеркала и короткофокусной линзы ($f \approx 30$ мм). На трассе длиной 120 м настройка адаптивной оптической системы выполняется в приближении плоской волны, что тестируется интерферограммой, полученной с помощью плоскопараллельной пластинки внутри экспериментальной системы.

Расчёт мощности приходящего на входную апертуру излучения для лазерного излучателя с диаметром плоскопараллельного пучка размером 5 мм и мощностью $I = 5$ мВт показал, что на входную апертуру приходится мощность 0,1 мВт.

На рис. 1 представлена оптическая схема адаптивной оптической системы, корректирующей искажения лазерного излучения на протяжённой атмосферной трассе в режиме реального времени.

Полупроводниковый лазер 1 с длиной волны 532 нм подсвечивает удалённый зеркально-линзовый отражатель 2. Излучение, пройдя через турбулентную атмосферу, попадает на приёмную апертуру телескопа 3. Поворотные зеркала 4, 5 через масштабирующую оптику 6 направляют излучение на зеркала Tip-Tilt 7 и 8 [4]. Посредством окуляра 9 и светоделительного кубика 11 излучение фокусируется на светочувствительной матрице видеокамеры 12, где по смещениям центра тяжести фокального пятна определяются общие наклоны волнового фронта, по которым формируются управляющие сигналы для зеркала Tip-Tilt, выполняющего стабилизацию излучения. Часть излучения, пройдя через светоделительный кубик 11, приходит на деформируемое зеркало 10; отразившись, излучение проходит в обратном направлении по той же оптической оси, при этом используются дополнительные светоделительные кубики 13 и 14.

Часть излучения направляется на светочувствительную матрицу видеокамеры 19, осуществляющей контроль качества коррекции деформируемым зеркалом 10. Другая часть

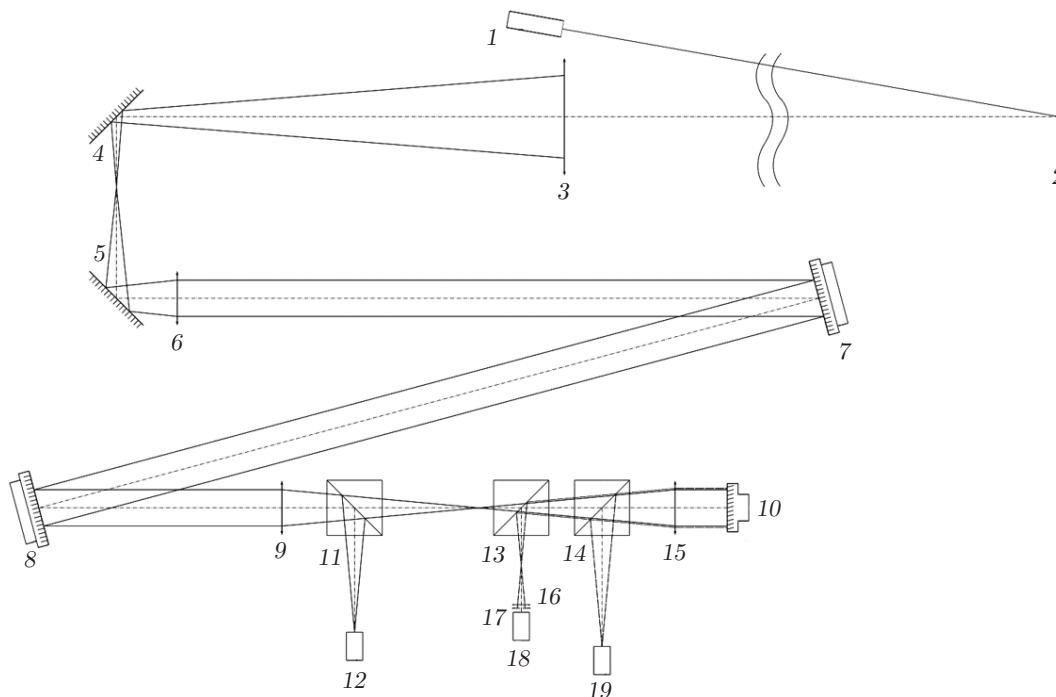


Рис. 1. Оптическая схема стенда адаптивной оптической системы

излучения с помощью второго светоделительного кубика 13 проходит через масштабирующую оптику 16 и попадает на датчик волнового фронта Шэка — Гартмана, состоящий из дифракционного линзового растра 17 и высокоскоростной видеокамеры 18. Датчик волнового фронта используется для управления деформируемым зеркалом 10, корректирующим искажения приходящего лазерного излучения.

На стенде адаптивной оптической системы (см. рис. 1) элементы расположены таким образом, что из источников фоновой засветки остаётся только переотражение излучения на поверхностях преломляющих оптических элементов [15].

Для расширения функциональных возможностей адаптивной оптической системы предусмотрен специальный блок, позволяющий эмулировать атмосферную турбулентность [16, 17].

Эмуляция атмосферной турбулентности. В предлагаемой работе сформулирована и затем апробирована на стенде адаптивной оптической системы эмуляция атмосферной турбулентности [18, 19].

Под воздействием атмосферной турбулентности и в результате собственных вибраций системы адаптивной оптики изображения излучения в фокальной плоскости флуктуируют во времени относительно оси распространения излучения, что приводит к изменению углов наклона волнового фронта. Эмуляция и моделирование наклонов волнового фронта лазерного излучения — это совокупность программных и технических средств, предполагающих воспроизведение предварительно смоделированных наклонов волнового фронта и их устранение из изображения излучения в фокальной плоскости. Набор управляющих сигналов для корректора наклонов формируется блоком эмуляции атмосферной турбулентности (рис. 2) как с помощью численной модели дрожания изображения лазерного излучения в фокальной плоскости [20], так и посредством результатов трассовых измерений, полученных ранее.

Блок эмуляции атмосферной турбулентности включает в себя жёстко связанные между собой на общем основании три источника лазерного излучения. На оптических осях данных источников излучения на равной высоте установлены светофильтры, диафрагмы,

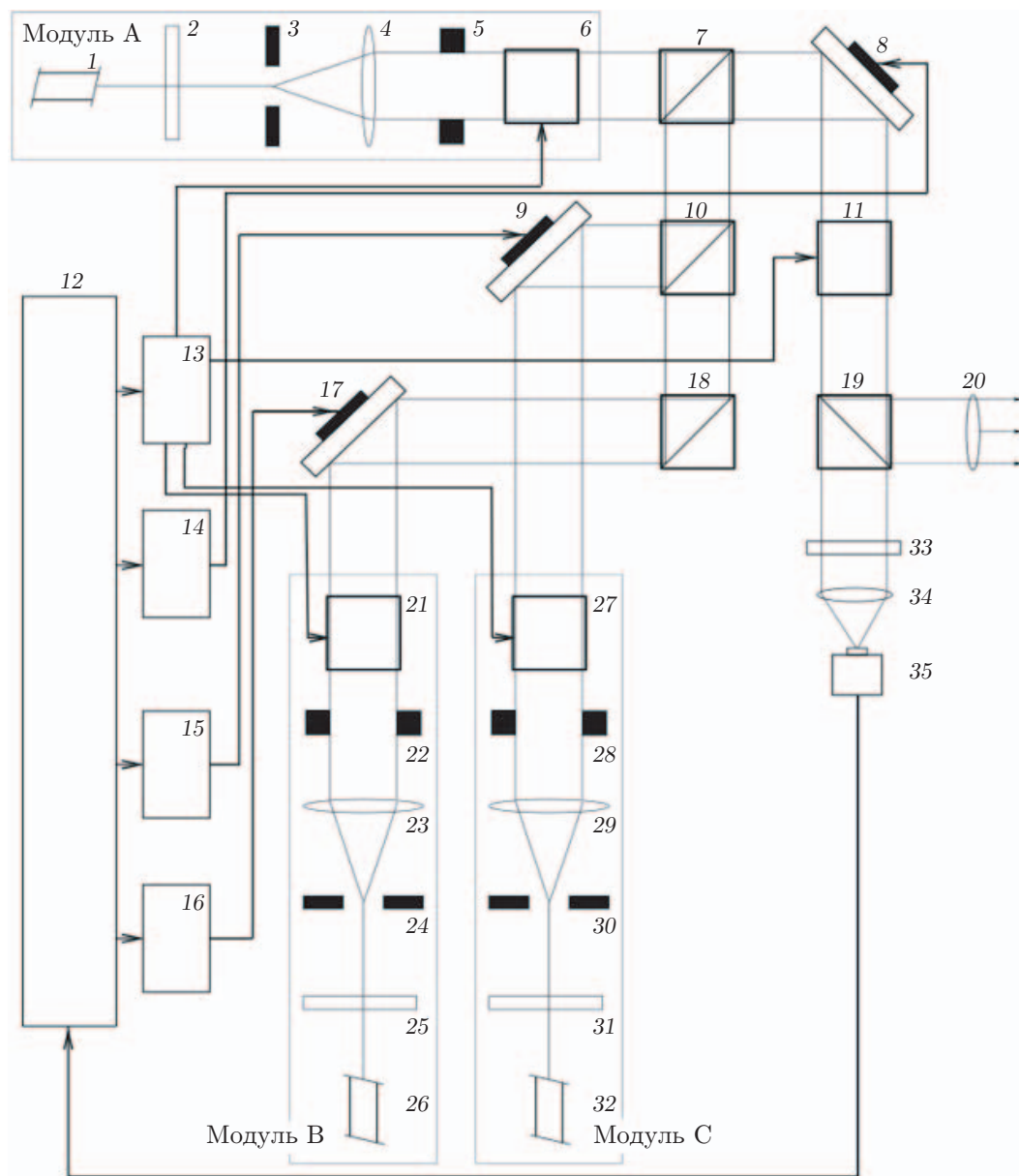


Рис. 2. Принципиальная схема блока эмуляции атмосферной турбулентности для настройки и тестирования адаптивных оптических систем, содержащего три модуля

масштабирующая оптика, регулируемые диафрагмы, электронагревательные элементы и видеокамера контроля. Пьезокерамические дефлекторы управляются компьютером. Светоделительные кубики совмещают оптические оси всех трёх источников лазерного излучения, и пучки соосно накладываются друг на друга.

Общий результирующий пучок и каждый оптический пучок в отдельности проходят над электронагревательными элементами с независимыми регулируемыми нагревами, создающими тепловые турбулентные потоки, что позволяет значительно увеличить число вариантов эмулируемой турбулентности.

Первый оптический пучок (модуль А) генерируется лазером 1 и проходит через светофильтр 2, задающий интенсивность пучка. Точечная диафрагма 3 и масштабирующая оптика 4 формируют коллимированный пучок, диаметр которого устанавливается регу-

лируемой диафрагмой 5. Пучок проходит над электронагревательным элементом 6, который создаёт тепловые воздушные потоки, вызывающие турбулентные искажения в пучке, и поступает на совмещающий светоделительный кубик 7. Аналогичным образом формируется второй оптический пучок (модуль В), генерируемый лазером 26. Пучок проходит через светофильтр 25, задающий интенсивность этого пучка, точечную диафрагму 24 и масштабирующую оптику 23, формирующую коллимированный пучок, который проходит через регулируемую диафрагму 22, устанавливающую диаметр эмулируемой локальной неоднородности. При прохождении над электронагревательным элементом 21 во втором пучке формируются турбулентные искажения волнового фронта, далее пучок поступает на пьезокерамический дефлектор 17, задающий колебания угла наклона пучка. В светоделительном кубике 18 пучок поворачивается на 90° , проходит через светоделительный кубик 10 и поступает на совмещающий световые пучки светоделительный кубик 7, где соосно совмещается с первым пучком.

Третий оптический пучок (модуль С) генерируется лазером 32, проходит через светофильтр 31, задающий его интенсивность, и формирующие коллимированный пучок точечную диафрагму 30 и масштабирующую оптику 29. Пучок проходит через регулируемую диафрагму 28, задающую диаметр эмулируемой локальной неоднородности. При прохождении над электронагревательным элементом 27 в третьем пучке формируются турбулентные искажения волнового фронта, после чего он поступает на пьезокерамический дефлектор 9, задающий колебания локального угла наклона пучка. В светоделительном кубике 10 пучок поворачивается на 90° и поступает на светоделительный кубик 7, где соосно совмещается с первым (основным) пучком, сгенерированным лазером 1.

При настройке оптического тракта второй и третий пучки соосно совмещаются с первым. На выходе суммарная интенсивность результирующего пучка, формируемого стендом, неоднородна в поперечном сечении пучка, так как изменяется компьютером согласно численным моделям, и на монохромном фотоприёмном устройстве регистрируется как неравномерно освещённое поле с программно-управляемым общим углом наклона волнового фронта с переменной флуктуирующей интенсивностью оптического излучения и подвижным фрагментом с программно-управляемым углом локального наклона.

Таким образом, все три оптических пучка соосно совмещаются на светоделительном кубике 7 и далее поступают на дефлектор 8, задающий колебания общего угла наклона волнового фронта всего образованного оптической системой пучка в целом. Сформированный системой суммарный пучок проходит над электронагревательным элементом 11, задающим ему турбулентные искажения с вертикальным ветровым переносом, и поступает на светоделительный кубик 19, где разветвляется. Одна ветвь поступает на выход стенда через масштабирующую оптику 20 и направляется на вход настраиваемой (тестируемой) оптической системы. Другая ветвь полученного пучка проходит через светофильтр 33, линзу 34 и формирует изображение на видеокамере контроля 35.

Сигнал с видеокамеры контроля, поступающий в компьютер 12, используется для настройки и контроля работы элементов стенда, а также для измерения турбулентных характеристик пучков. Через блок управления электронагревательными элементами 13 компьютер обеспечивает формирование тепловых потоков воздуха над электронагревательными элементами 6, 11, 21, 27 и управляет их интенсивностью для создания в оптических пучках требуемой турбулентности. Через блоки управления 14, 15, 16 компьютер на основе численных моделей [20] задаёт наклоны зеркал дефлекторов 9, 8, 17, формируя углы наклона волнового фронта соответствующих пучков.

На стенде могут быть сформированы: программно-управляемые зеркалами Tip-Tilt оптические пучки (вариант 1) с возможностью их повторного воспроизведения, турбулентные пучки, образованные над электронагревательными элементами (вариант 2), а также множество различных сочетаний обоих вариантов.

Следящая адаптивная оптическая система с контуром опережающей коррекции. Типичная следящая оптическая система [21] компенсирует вызванные действием атмосферной турбулентности случайные угловые смещения энергетического центра тяжести (ЭЦТ) изображения излучения в плоскости регистрации. Сигналы управления зеркалом Tip-Tilt [9] пропорциональны угловым смещениям ЭЦТ изображения лазерного излучения в плоскости регистрации. Угол наклона поверхности корректирующего зеркала Tip-Tilt устанавливается в соответствии с углом наклона оптического пучка.

Недостатком данной системы является то, что при регистрации следующего кадра наклон корректирующего зеркала Tip-Tilt устанавливается с задержкой относительно корректируемых параметров, что в условиях турбулентной атмосферы снижает точность и качество коррекции.

Проблема может быть решена дополнением следящей адаптивной оптической системы контуром опережающей коррекции ошибки углов наклона оптического пучка. Ошибка обусловлена постоянным механическим запаздыванием следящего корректирующего зеркала Tip-Tilt. За счёт опережающей установки углов наклона дополнительного корректирующего зеркала Tip-Tilt в положение, соответствующее углам наклона волнового фронта на момент следующего кадра и не имеющее времени запаздывания на момент регистрации, получим изображение лазерного излучения в фокальной плоскости системы повышенной точности.

Следящая адаптивная оптическая система с опережающей коррекцией содержит два контура. В первом контуре с замкнутой обратной связью наклоном зеркала Tip-Tilt осуществляется слежение и регистрация в реальном времени координат ЭЦТ изображения излучения в фокальной плоскости адаптивной оптической системы, обеспечивающие их стабилизацию на светочувствительной матрице видеокамеры первого контура. Во втором контуре зеркалом Tip-Tilt производится коррекция координат ЭЦТ изображения излучения в фокальной плоскости видеокамеры второго контура с компенсацией ошибки смещения ЭЦТ изображения, вызванной временной задержкой первого контура системы. В результате в момент регистрации каждого кадра видеокамерой второго контура суммарные углы наклона последовательно установленных зеркал Tip-Tilt равны углам наклона волнового фронта на входной апертуре системы в противофазе (т. е. со знаком «—»), что обеспечивает точность регистрации принимаемого изображения излучения в фокальной плоскости системы без отставания во времени.

Временная диаграмма углов наклона лазерного излучения во время работы оптической системы без опережающей коррекции углов наклона лазерного пучка приведена на рис. 3.

Точность измерений угловых смещений ЭЦТ изображения излучения также зависит от постоянно меняющихся в условиях турбулентной атмосферы размера и формы изображения на светочувствительной матрице видеокамеры. Отсутствие синхронизации в работе оптической адаптивной системы и регистрирующей видеокамеры не позволяет полностью устранить дрожание изображения, а траектория из угловых смещений ЭЦТ изображения будет иметь ступенчатый характер.

Оптическая система настраивается таким образом, чтобы изображение излучения находилось в центре светочувствительной матрицы видеокамеры первого контура. Координатам ЭЦТ изображения первого кадра присваиваются нулевые значения в системе координат светочувствительной матрицы видеокамеры.

На рис. 4 представлена схема следящей оптической системы с контуром опережающей коррекции.

Оптическое излучение распространяется через объектив 1, отражается от следящего зеркала Tip-Tilt 2 первого контура, проходит через светоделительный кубик 4 и фокусируется на светочувствительной матрице видеокамеры 5, где регистрируется текущее

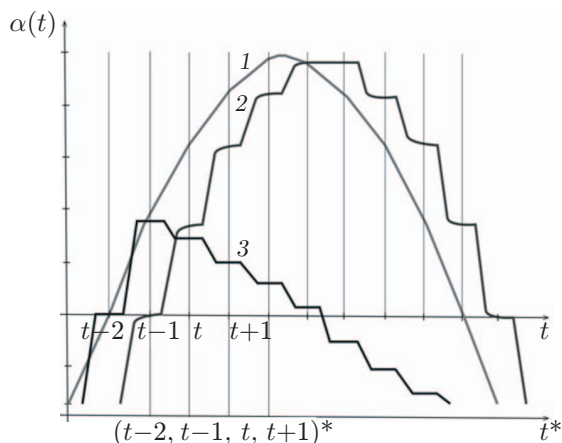


Рис. 3

Рис. 3. Временная диаграмма угла наклона α лазерного излучения, где кривая 1 соответствует траектории угла наклона волнового фронта на входной апертуре системы, кривая 2 — траектории угла наклона следящего зеркала Tip-Tilt, кривая 3 — траектории угла наклона корректирующего зеркала Tip-Tilt, представляющая ошибку измерений одной из координат ЭЦТ изображения

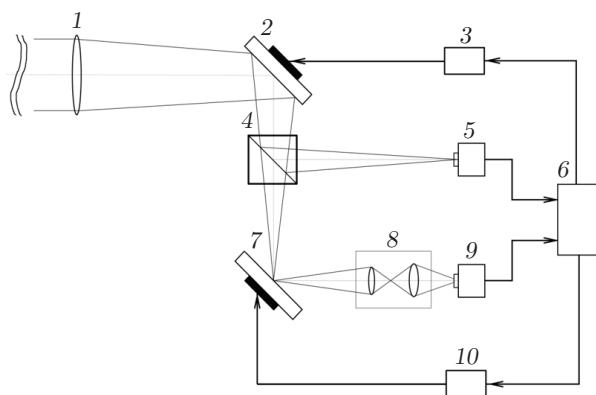


Рис. 4

Рис. 4. Схема следящей оптической системы с контуром опережающей коррекции

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

По координатам ЭЦТ изображений последних трёх кадров, сохранённых в сдвиговом регистре блока управления 6, и формулам, представляющим разложение траектории движения координат ЭЦТ изображения лазерного пучка в ряд Тейлора [22], рассчитываются управляющие сигналы, поступающие через блок управления 10 на зеркало Tip-Tilt 7 второго контура.

Количество кадров может быть принято более трёх, что может повысить точность вычисления, при этом практически не снижая скорости работы системы.

Тестировать эффективность алгоритмов опережающей коррекции, предназначенных для повышения точности и быстродействия адаптивной системы, целесообразно на основе анализа измерений, полученных датчиком волнового фронта Шэка — Гартмана [23] в системе адаптивной оптики.

Тестирование алгоритмов опережающей коррекции на основе измерений датчика волнового фронта Шэка — Гартмана. В датчике Шэка — Гартмана световое поле делится линзовым растром на парциальные пучки, которые фокусируются на светочувствительной матрице видеокамеры и представляют собой совокупность фокальных пятен, оцениваемых алгоритмами центроидирования (centroiding algorithms), вычисляющими координаты ЭЦТ фокальных пятен (центроидов) в плоскости регистрации [24, 25].

Динамическая картина перемещения фокальных пятен в плоскости регистрации датчика Шэка — Гартмана определяется движением оптических неоднородностей турбулентной атмосферы вдоль входной апертуры системы под действием поперечной составляющей скорости ветра V_x и характеризуется изменением координаты ξ центроидов на гартманогамме в плоскости видеокамеры [26, 27].

Траектория движения центра тяжести $S(t)$ или траектория изменений координаты ξ заданы случайной функцией, которая может быть разложена в ряд Тейлора. Функция (сигнал) сложной формы представляется 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 центра тяжести $S(t)$ в окрестности точки τ может быть представлена в виде

$$S(t) = P_n(t) + R_n(t), \quad (1)$$

где выражение вида

$$P_n(t) = S(\tau) + S'(\tau) \frac{t + \tau}{1!} + S''(\tau) \frac{(t + \tau)^2}{2!} + \dots + S^{(n-1)}(\tau) \frac{(t + \tau)^{n-1}}{(n-1)!} \quad (2)$$

представляет собой ряд разложения функции $S(t)$ по положительным степеням двучлена $t + \tau$.

При вычислении значений функций с заданной точностью, т. е. при допущении, что приращение Δt совпадает со временем между кадрами и 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), используется остаточный член в форме Лагранжа:

$$R_n(t) = \frac{S^{(n)}(\tau + \theta(t + \tau))}{n!} (t + \tau)^n, \quad 0 < \theta(t + \tau) < 1. \quad (3)$$

Приращение по координате ξ может быть представлено выражением $\Delta \xi_t = \xi_t - \xi_{t-1}$, тогда первая производная в момент $t + 1$ выражается как $(\Delta \xi_t / \Delta t) \Delta t$. Величина $\Delta \xi_t / \Delta t$ определяет скорость изменения координаты ξ от момента времени $t - 1$ до момента t . Отношение приращений $\Delta \xi_{t-1} / \Delta t$ определяет скорость изменения координаты ξ от момента времени $t - 2$ до момента $t - 1$.

Изменение скорости приращения координаты центра тяжести от момента времени $t - 2$ до момента t является ускорением, с которым меняется координата ξ , и может быть записано как $(\Delta \xi_t / \Delta t - \Delta \xi_{t-1} / \Delta t) \Delta t$.

Изменение ускорения приращения координаты ξ от момента времени $t - 3$ до момента t является рывком, с которым меняется координата ξ , и может быть записано в виде $[(\Delta \xi_t / \Delta t - \Delta \xi_{t-1} / \Delta t) \Delta t - (\Delta \xi_{t-1} / \Delta t - \Delta \xi_{t-2} / \Delta t) \Delta t] \Delta t$.

Первое слагаемое в выражении (2) соответствует координате центра тяжести в момент времени t : $S(\tau) = \xi_t$. Для конкретной адаптивной системы отношение времени прогноза τ ко времени между кадрами не меняется, т. е. $\tau / \Delta t = \text{const}$ и $\tau / \Delta t \leq 1$.

Поскольку приращение Δt при вычислении производной совпадает со временем между кадрами, то второе слагаемое, включающее в себя первую производную функции $S(t)$, выражается следующим образом:

$$S'(\tau) \frac{t + \tau}{1!} = S'(t) \Delta t = \frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} \Delta t = \xi_t - \xi_{t-1}. \quad (4)$$

Третье слагаемое представляет собой вторую производную функции $S(t)$:

$$\begin{aligned} S''(\tau) \frac{(t+\tau)^2}{2!} &= S''(t) \frac{(\Delta t)^2}{2} = \frac{1}{2} (S'(t))' (\Delta t)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} \right)' (\Delta t)^2 = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\Delta \xi_t}{\Delta t} - \frac{\Delta \xi_{t-1}}{\Delta t} \right) \frac{1}{\Delta t} \right\} (\Delta t)^2 = \frac{1}{2} \{ (\xi_t - \xi_{t-1}) - (\xi_{t-1} - \xi_{t-2}) \} = \frac{1}{2} (\xi_t - 2\xi_{t-1} + \xi_{t-2}), \end{aligned} \quad (5)$$

четвёртое слагаемое — третью производную:

$$S'''(\tau) \frac{(t+\tau)^3}{3!} = \frac{1}{6} (\xi_t - 3\xi_{t-1} + 3\xi_{t-2} - \xi_{t-3}),$$

пятое — четвёртую производную:

$$S^{(4)}(\tau) \frac{(t+\tau)^4}{4!} = \frac{1}{24} (\xi_t - 4\xi_{t-1} + 6\xi_{t-2} - 4\xi_{t-3} + \xi_{t-4}).$$

Таким образом, разложение траектории движения координаты ξ центраида в ряд Тейлора по первой и второй производным имеет вид

$$P_3(t) = \xi_t + \frac{1}{2} (3\xi_t - 4\xi_{t-1} + \xi_{t-2})$$

с остаточным членом

$$R_3(t) = \frac{1}{12} (-\xi_t + 2\xi_{t-1} - \xi_{t-2}).$$

Соответственно,

$$P_4(t) = \xi_t + \frac{1}{6} (10\xi_t - 15\xi_{t-1} + 6\xi_{t-2} - \xi_{t-3}),$$

$$R_4(t) = \frac{1}{144} (-8\xi_t + 21\xi_{t-1} - 18\xi_{t-2} + 5\xi_{t-3});$$

$$P_5(t) = \xi_t + \frac{1}{24} (41\xi_t - 64\xi_{t-1} + 30\xi_{t-2} - 8\xi_{t-3} + \xi_{t-4}),$$

$$R_5(t) = \frac{1}{2880} (-55\xi_t + 176\xi_{t-1} - 210\xi_{t-2} + 112\xi_{t-3} - 23\xi_{t-4}).$$

Вычисление прогнозируемого значения координаты ξ_{t+1} через разложение траектории движения координаты центраида в ряд Тейлора по первой и второй производным (с учётом, что $\tau/\Delta t = 1$), представляя сумму первого, второго и третьего слагаемых, в компактной форме может быть записано в следующем виде:

$$\xi_{t+1} = 2,5\xi_t - 2\xi_{t-1} + 0,5\xi_{t-2}; \quad (6)$$

по первой, второй и третьей производным как сумма первого, второго, третьего и четвёртого слагаемых имеет вид

$$\xi_{t+1} = 2,667\xi_t - 2,5\xi_{t-1} + \xi_{t-2} - 0,167\xi_{t-3}; \quad (7)$$

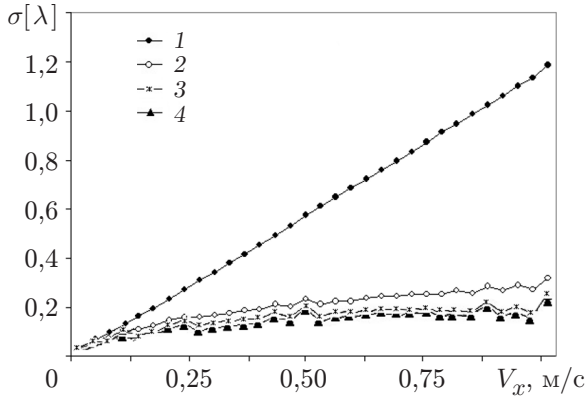


Рис. 5

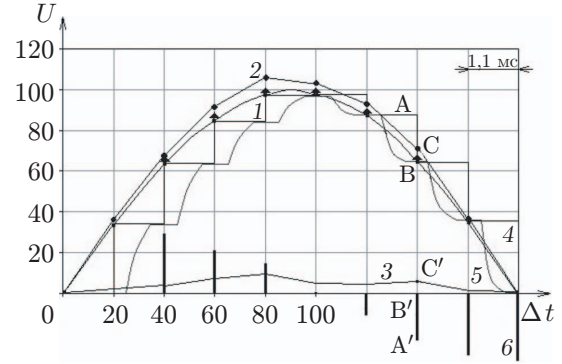


Рис. 6

Рис. 5. Среднеквадратическая ошибка реконструкции волнового фронта датчиком Шэка — Гартмана относительно координаты ξ центроида на гартманограмме

Рис. 6. Расчётные оценки опережающей коррекции ошибки углов наклона пучка

по первой, второй, третьей и четвёртой производным представляет сумму первого, второго, третьего, четвёртого и пятого слагаемых:

$$\xi_{t+1} = 2,708\xi_t - 2,667\xi_{t-1} + 1,25\xi_{t-2} - 0,333\xi_{t-3} + 0,042\xi_{t-4}. \quad (8)$$

Вычисление прогнозируемого значения координаты ξ_{t+1} с учётом остаточного члена в соответствии с формулами (6)–(8) выражается следующим образом:

$$\xi_{t+1} = 2,416\xi_t - 1,833\xi_{t-1} + 0,417\xi_{t-2}, \quad (9)$$

$$\xi_{t+1} = 2,611\xi_t - 2,354\xi_{t-1} + 0,875\xi_{t-2} - 0,132\xi_{t-3}, \quad (10)$$

$$\xi_{t+1} = 2,689\xi_t - 2,605\xi_{t-1} + 1,177\xi_{t-2} - 0,294\xi_{t-3} + 0,033\xi_{t-4}. \quad (11)$$

На рис. 5 представлена среднеквадратическая ошибка реконструкции волнового фронта относительно координаты ξ центроида на гартманограмме, регистрируемой в плоскости видеокамеры в момент времени $t + \Delta t$. Расчёт сигнала отработки адаптивной системой выполнен при различных значениях поперечной составляющей скорости ветра V_x , полученных по предварительным оценкам скорости ветрового переноса турбулентных неоднородностей на входной апертуре системы на основе датчика волнового фронта Шэка — Гартмана [26]. Значения скорости ветрового переноса V_x соответствуют варьированию времени между анализируемыми кадрами, т. е. длине временного интервала Δt .

Кривая 1 представляет прогноз по последнему значению, что соответствует работе адаптивной системы с постоянным запаздыванием: $\xi_{t+\Delta t} = \xi_t$. Кривая 2 характеризует изменение среднеквадратической ошибки реконструкции волнового фронта по координате ξ для адаптивной системы с коррекцией, опережающей на время Δt , и представляет собой вычисление координаты ξ с опережением по формуле Тейлора по первой и второй производным; кривая 3 — по первой, второй и третьей производным; кривая 4 — по первой, второй, третьей и четвёртой производным. Значения среднеквадратической ошибки представлены в длинах волн.

Для выборки длиной 4096 реализаций достоверность определения ξ для адаптивной системы с опережающей коррекцией (кривые 2–4) составила 0,1 [28].

В блоке эмуляции атмосферной турбулентности элементом 11 (см. рис. 2) формируется искажённый атмосферной турбулентностью пучок с ветровым переносом турбулентных неоднородностей.

Из рис. 5 следует, что при скорости ветрового переноса турбулентных неоднородностей 1 м/с среднеквадратическая ошибка реконструкции волнового фронта с применением опережающего формирования поверхности волнового фронта уменьшается в 5–6 раз. Таким образом, опережающая коррекция даёт наименьшую ошибку при расчёте сигналов отработки системой, что соответствует также условию гладкости функции в её разложении по формуле Тейлора [29].

Очевидно, что количество слагаемых, используемых в разложении траектории движения координаты ξ центроида в ряд Тейлора, влияет на значение остаточной ошибки реконструкции волнового фронта, причём с увеличением порядка производных в разложении уменьшение среднеквадратической ошибки становится незначительным.

На рис. 6 демонстрируется механизм работы корректора наклонов в адаптивной системе с контуром опережающей коррекции.

Приведены расчётные оценки опережающей коррекции ошибки углов наклона лазерного пучка, обусловленной постоянным механическим запаздыванием следящего зеркала Tip-Tilt (см. рис. 4), на основе формулы Тейлора по первой, второй и третьей производным (7) относительно одной координаты ξ (одного угла наклона).

Кривая 1 представляет собой управляющее напряжение на зеркале Tip-Tilt первого контура (см. рис. 4). Максимальное напряжение равно 100 В (динамический диапазон углов наклона зеркала Tip-Tilt составляет ± 115 угл. с); кривая 2 — угол наклона, включающий ошибку, обусловленную запаздыванием зеркала Tip-Tilt; кривая 3 — ошибку установки зеркала Tip-Tilt первого контура, соответствующую рассчитанным по формуле (7) значениям угла наклона. Ошибка установки зеркала Tip-Tilt по углам, рассчитанным на основе формулы (8), практически совпадает с кривой 3, что говорит о технических ограничениях зеркала Tip-Tilt (разрешающая способность по углу составляет 0,05 угл. с).

На рис. 6 линия 4 характеризует ступенчатый характер изменения угла поворота зеркала Tip-Tilt; кривая 5 иллюстрирует электронное демпфирование зеркала Tip-Tilt; линия 6 представляет собой амплитуду демпфирования [13]: $A'B' = AB$. Величина опережающей коррекции угла наклона, данная на рис. 6 как CB , демонстрирует ошибку установки зеркала Tip-Tilt первого контура, обозначенную как $C'B'$.

Закключение. В работе представлены способы повышения эффективности адаптивных оптических систем на горизонтальных трассах.

Включение в двухконтурную следящую адаптивную оптическую систему дополнительного блока эмуляции атмосферной турбулентности с возможностью её повторного воспроизведения позволяет быстро настроить работу адаптивной системы.

Показано, что для расчёта управляющих сигналов в блоке опережающей коррекции, решающей проблемы задержки в контуре коррекции зеркалом Tip-Tilt наклонов лазерного пучка разложением в ряд Тейлора координаты центроида, который зарегистрирован в момент времени t , из-за технических ограничений зеркала Tip-Tilt достаточно использовать первую, вторую и третью производные траектории, описывающей движение центроида как функции времени. Другими словами, достаточно четырёх кадров, сохранённых в сдвиговом регистре блока управления, чтобы обеспечить точность и быстродействие системы.

Для следующей модификации зеркала Tip-Tilt будут проведены исследования влияния производных более высоких порядков, что предполагает учёт большего количества кадров.

Новизна проведённых научных исследований подтверждена полученными патентами РФ на техническую реализацию следящей адаптивной оптической системы с контуром опережающей коррекции [30, 31].

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fried D. L., Mevers G. E.** Evaluation of r_o for Propagation Down Through the Atmosphere // *Appl. Opt.* 1974. **13**, Iss. 11. P. 2620–2622.
2. **Noll R. J.** Zernike polynomials and atmospheric turbulence // *JOSA.* 1976. **66**, Iss. 3. P. 207–211.
3. **Roddier F.** Adaptive Optics in Astronomy. N. Y.: Cambridge University Press, 1999. 411 p.
4. **Hardy J. W.** Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. N. Y.: Oxford University Press, 1998. 431 p.
5. **Лубков А. А., Попов Ю. А.** Современные солнечные телескопы наземного базирования и требования к системам их автоматизации // *Автометрия.* 2019. **55**, № 1. С. 111–128. DOI: 10.15372/AUT20190114.
6. **Kudryashov A. V., Rukosuev A. L., Nikitin A. N. et al.** Real-time 1.5 kHz adaptive optical system to correct for atmospheric turbulence // *Opt. Exp.* 2020. **28**, Iss. 25. P. 37546–37552.
7. **Боршевников А. Н., Дементьев Д. А., Леонов Е. В. и др.** Управление адаптивной оптической системой с деформируемыми зеркалами низкого и высокого пространственных разрешений // *Автометрия.* 2018. **54**, № 3. С. 119–125. DOI: 10.15372/AUT20180315.
8. **Galaktionov I., Sheldakova J., Samarkin V. et al.** Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors // *Photonics.* 2023. **10**, Iss. 10. DOI: 10.3390/photonics10101147.
9. **Топоровский В. В., Кудряшов А. В., Самаркин В. В. и др.** Исследование охлаждаемого деформируемого зеркала на пьезоактюаторах для коррекции атмосферных флуктуаций фазы // *Оптика атмосферы и океана.* 2020. **33**, № 9. С. 677–684.
10. **Шанин О. И.** Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.
11. **Бокало С. Ю., Бокашов И. М., Ляхов Д. М. и др.** Стабилизация астрономических изображений с помощью управляемого плоского зеркала // *Автометрия.* 2018. **54**, № 1. С. 54–60. DOI: 10.15372/AUT20180108.
12. **Zhao D., Song Y., Liu Y. et al.** Research on control technology of tip-tilt mirror system in adaptive optics // *Journ. Phys.: Conf. Ser.* 2021. **2087**. DOI: 10.1088/1742-6596/2087/1/012056.
13. **Пат. 181166 РФ.** Двухкоординатный пьезокерамический корректор углов наклона волнового фронта / Л. В. Антошкин, А. Г. Борзилов. Оpubл. 05.07.2018, Бюл. № 19.
14. **Nikitin A. N., Galaktionov I. V., Sheldakova J. V. et al.** Calibration of a Shack-Hartmann wavefront sensor using spherical wavefronts from a point source // *Proc. SPIE.* 2022. **11987**. 119870J. DOI: 10.1117/12.2615161.
15. **Дяченко И. В., Захаров Н. С.** Расчёт величины рассеянного излучения в оптических системах // *Оптика атмосферы и океана.* 1993. **6**, № 11. С. 1465–1470.
16. **Voelz D. G., Wijerathna E., Muschinski A., Xiao X.** Computer simulations of optical turbulence in the weak- and strong-scattering regime: Angle-of-arrival fluctuations obtained from ray optics and wave optics // *Opt. Eng.* 2020. **57**, Iss. 10. DOI: 10.1117/1.OE.57.10.104102.
17. **Benton D. M., Ellis A. D., Li Y., Hu Z.** Emulating atmospheric turbulence effects on a micro-mirror array: Assessing the DMD for use with free-space-to-fibre optical connections // *Eng. Res. Exp.* 2022. **4**, N 4. 045004. DOI: 10.1088/2631-8695/ac7d49.

18. **Пат. 2788312 РФ.** Способ и устройство эмуляции атмосферной турбулентности для настройки и тестирования адаптивных оптических систем / Л. В. Антошкин, Л. Н. Лавринова, В. В. Лавринов, А. А. Селин, А. Г. Борзилов. Оpubл. 17.01.2023, Бюл. № 2.
19. **Лавринов В. В., Антошкин Л. В., Лавринова Л. Н., Селин А. А.** О стабилизации оптического излучения в турбулентной атмосфере // *Автометрия*. 2023. **59**, № 2. С. 89–102. DOI: 10.15372/AUT20230210.
20. **Antoshkin L. V., Borzilor A. G., Lavrinov V. V., Lavrinova L. N.** Program-hardware complex for optical beams formation with modeled tilt angels // *Proc. SPIE*. 2017. **10466**. 104660X. DOI: 10.1117/12.2284987.
21. **Антошкин Л. В., Ботыгина Н. Н., Емалеев О. Н. и др.** Адаптивная оптическая система для коррекции искажений изображения // *Оптика атмосферы и океана*. 1989. **2**, № 6. С. 621–627.
22. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы / Под ред. И. Г. Арамановича; Пер. с англ. И. Г. Арамановича, А. М. Березмана, И. А. Вайнштейна, Л. З. Румшиского, Л. Я. Цлафа. Изд. 4-е. М.: Наука, 1978. 831 с.
23. **Канев Ф. Ю., Аксенов В. П., Макенова Н. А., Веретехин И. Д.** Сравнение точности определения координат оптических вихрей различными методами // *Автометрия*. 2020. **56**, № 3. С. 12–19. DOI: 10.15372/AUT20200302.
24. **Lardière O., Conan R., Clare R. et al.** Performance comparison of centroiding algorithms for laser guide star wavefront sensing with extremely large telescopes // *Appl. Opt.* 2010. **49**, Iss. 31. P. G78–G94. DOI: 10.1364/AO.49.000G78.
25. **Lechner D., Zepp A., Eichhorn M., Gladysz S.** Adaptable Shack-Hartmann wavefront sensor with diffractive lenslet arrays to mitigate the effects of scintillation // *Opt. Exp.* 2020. **28**, Iss. 24. P. 36188–36205. DOI: 10.1364/OE.410217.
26. **Лавринов В. В., Лавринова Л. Н., Голенева Н. В.** Определение величины и направления поперечной составляющей скорости ветра на входной апертуре датчика волнового фронта Шэка — Гартмана по его измерениям // *Изв. вузов. Сер. Физика*. 2013. **56**, № 8/3. С. 217–220.
27. **Волков М. В., Богачев В. А., Стариков Ф. А., Шнягин Р. А.** Численные исследования динамической адаптивной фазовой коррекции турбулентных искажений излучения и оценка их временных характеристик с помощью датчика Шэка — Гартмана // *Оптика атмосферы и океана*. 2021. **34**, № 7. С. 547–554.
28. **Тейлор Дж.** Введение в теорию ошибок / Пер. с англ. Л. Г. Деденко. М.: Мир, 1985. 272 с.
29. **Алексеев Д. В., Казунина Г. А., Алексеевская Г. В.** Элементарные аналитические методы и свойства основных элементарных функций. Кемерово: КузГТУ, 1998. 91 с.
30. **Пат. 2768541 РФ.** Способ и устройство с опережающей коррекцией в оптической системе с замкнутой обратной связью / Л. В. Антошкин, Л. Н. Лавринова, В. В. Лавринов. Оpubл. 24.03.2022, Бюл. № 9.
31. **Пат. 2799987 РФ.** Адаптивная оптическая следящая система с контуром опережающей коррекции / Л. В. Антошкин, Л. Н. Лавринова, В. В. Лавринов. Оpubл. 14.07.2023, Бюл. № 20.

Поступила в редакцию 25.03.2024

После доработки 03.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024