

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 550.388.2; 554.510.535

# КОРРЕКЦИЯ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА СТЕНДЕ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2025 г. В. В. Лавринов<sup>а,\*</sup>, Л. В. Антошкин<sup>а</sup>, Л. Н. Лавринова<sup>а</sup>, А. А. Селин<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: lvv@iao.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 11.06.2024 г.

Принята к публикации 28.06.2024 г.

Описаны принципы действия и практическая конструкция элементов созданного экспериментального стенда следящей адаптивной оптической системы для формирования и коррекции турбулентных искажений лазерного излучения. Стенд позволяет осуществлять эмуляцию атмосферной турбулентности с возможностью ее повторного воспроизведения для настройки адаптивной системы, корректировать искажения, обусловленные атмосферной турбулентностью, а также корректировать общие наклоны волнового фронта. Приведены результаты испытаний разработанного Tip–Tilt-зеркала в составе следящей адаптивной оптической системы.

DOI: 10.31857/S0032816225010136, EDN: GHORLP

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным и эффективным методом повышения качества принимаемого изображения в условиях влияния турбулентной атмосферы является стабилизация положения излучения в плоскости приемного устройства адаптивной системы. Стабилизация угловых смещений изображения осуществляется путем компенсации наклонов волнового фронта принимаемого излучения скоростным управляемым Tip–Tilt-зеркалом [1–3]. Для коррекции искажений, связанных с наличием аберраций высоких порядков, используются деформируемые зеркала [4].

В ИОА СО РАН разработано Tip–Tilt-зеркало, предназначенное для управления углами наклонов излучения и стабилизации его изображения на входной апертуре оптической системы. Следящее устройство с замкнутым контуром управления общими наклонами волнового фронта состоит из скоростной видеокамеры и управляемого по углам Tip–Tilt-зеркала.

Tip–Tilt-зеркало включает в себя электронный блок управления, работающий с цифро-

выми и аналоговыми входными сигналами, и исполнительное устройство, созданное на основе пьезокерамических актюаторов и плоского зеркала. Оригинальные конструктивные решения исполнительного устройства обеспечивают сохранение плоскостности зеркала во всем диапазоне углов коррекции, а электронная система демпфирования подавляет вибрации зеркала при импульсном управляющем сигнале.

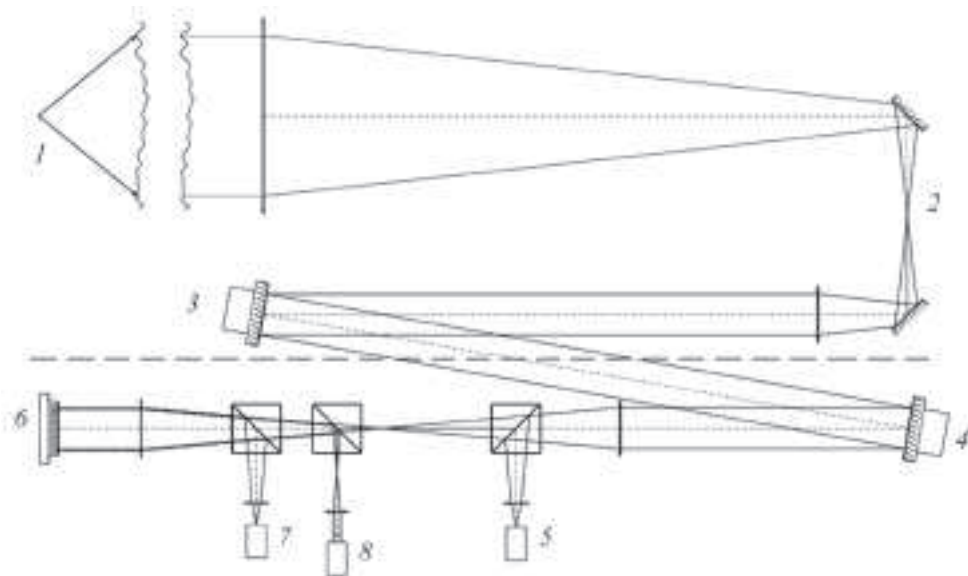
Системы адаптивной оптики с Tip–Tilt-зеркалом применяются в астрономических телескопах, наземных системах видения в турбулентной атмосфере и лазерных оптоэлектронных системах, функционирующих на атмосферных трассах.

Поскольку разработка адаптивной оптической системы является трудоемким и дорогим процессом, коллективом авторов статьи был разработан стенд адаптивной оптической системы для исследования коррекции турбулентных искажений лазерного излучения, позволяющий провести предварительные испытания техники, методов и алгоритмов управления адаптивной оптической системой.

## 2. ОПИСАНИЕ СТЕНДА СЛЕДЯЩЕЙ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

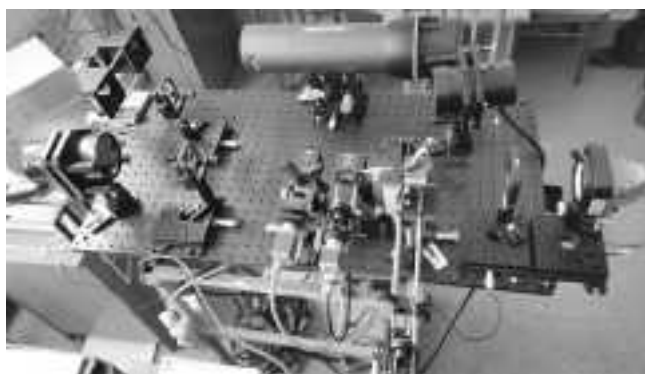
Основными элементами корректирующего контура любой адаптивной оптической системы в большинстве случаев являются управляемое деформируемое зеркало, позволяющее корректировать форму волнового фронта, и датчик волнового фронта в качестве элемента, регистрирующего искажения волнового фронта, обусловленные турбулентной атмосферой. Электронная система управления замыкает обратную связь между датчиком волнового фронта и управляемым оптическим элементом.

Программно-аппаратный комплекс стенда (рис. 2) позволяет моделировать общие наклоны волнового фронта с задаваемыми параметрами с возможностью воспроизведения и повторения любого временного фрагмента смоделированной выборки атмосферной турбулентности. Набор управляющих сигналов для Tip-Tilt-зеркала и деформируемого зеркала может формироваться как с помощью численной модели датчика волнового фронта Шэка-Гартмана [7], так и ранее зафиксированными искажениями волнового фронта. Предусмотрена возможность использования стенда в реальном времени на атмосферной трассе в условиях реальной атмосферы.



**Рис. 1.** Схема стенда следящей адаптивной оптической системы для исследования коррекции турбулентных искажений лазерного излучения: 1 – точечный источник или тестовое изображение, 2 – система поворотных зеркал, 3 – моделирующее Tip-Tilt-зеркало, 4 – корректирующее Tip-Tilt-зеркало, 5 – датчик наклонов волнового фронта, 6 – деформируемое зеркало, 7 – видеокамера, 8 – датчик волнового фронта.

На нашем стенде (рис. 1) коррекция реализована с помощью двух независимых контуров. Первый контур реализует эмуляцию атмосферной турбулентности [5, 6] и состоит из Tip-Tilt-зеркала 3, формирующего наклоны волнового фронта, и Tip-Tilt-зеркала 4, корректирующего наклоны. Tip-Tilt-зеркало 4 используется для коррекции наклонов волнового фронта излучения с частотой 1 кГц. Второй контур, построенный на основе датчика волнового фронта Шэка-Гартмана и биморфного деформируемого зеркала, используется для коррекции аберраций волнового фронта, начиная с аберраций второго порядка и работающего на частоте до 300 Гц.



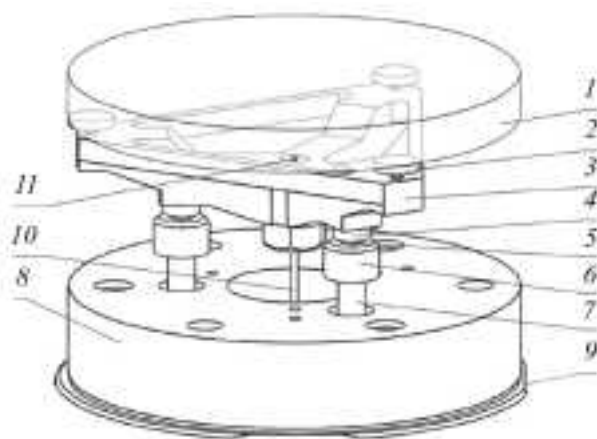
**Рис. 2.** Внешний вид стенда адаптивной оптической системы.

Стенд обеспечивает проведение измерений в нескольких режимах: по изображению с использованием корреляционного алгоритма работы датчика волнового фронта Шэка–Гартмана [8]; по энергетическим центрам тяжести гартманогаммы [9] и по энергетическому центру тяжести всего пучка [10].

### 3. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ТИР–ТИЛТ-ЗЕРКАЛА

Специфика работы современных адаптивных оптических систем с фазовыми измерениями волнового фронта [11] требует от Тир–Тилт-зеркала повышенной точности передачи отраженного волнового фронта, падающего на зеркало; сохранения плоскостности поверхности зеркала во всем диапазоне рабочих углов; увеличения рабочей частоты поворота зеркала; повышенной точности и стабильности. В моделях серии ДП реализованы конструктивные решения, которые удовлетворяют указанным требованиям. Устройство защищено двумя патентами РФ [12, 13].

Тир–Тилт-зеркало содержит электронный блок управления, работающий с цифровыми и аналоговыми входными сигналами, что расширяет возможности его применения. Исполнительное устройство на основе плоского зеркала, установленного на пьезокерамических актюаторах, представлено на рис. 3.



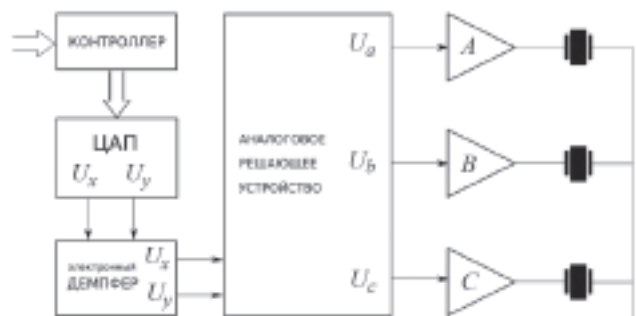
**Рис. 3.** Конструкция оптической головки дефлектора ДП-04: 1 – зеркало, 2 – опора, 3 – подвижная платформа, 4 – гнезда на подвижной опоре, 5 – стальные шарики, помещенные в гнезда, 6 – фланцы, взаимодействующие с шариками, 7 – пьезоактюаторы, 8 – обойма для крепления зеркала, 9 – основание обоймы, 10 – струна, закрепляющая зеркало к обойме, 11 – точка крепления струны на зеркале, относительно которой проходит поворот платформы.

В оптическую головку входят плоское зеркало 1, которое приклеено к опорам 2, зафиксированным на подвижной платформе 3. Платформа совершает движение на стальных шариках 5, помещенных в гнезда 4 фланцев 6, надетых на пьезоактюаторы 7. Вся оптическая головка фиксируется натяжением струны 10, закрепленной в центральной точке 11 подвижной платформы 3. Поворот платформы происходит относительно основания 9 с обоймой 8.

Управляющие сигналы после формирования цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) в аналоговом виде имеют ступенчатую форму с широким частотным спектром. При каждом ступенчатом изменении управляющего напряжения на выходах усилителей происходит линейная деформация пьезокерамических актюаторов, что вызывает повороты установленного на них зеркала 1. Оно поворачивается вокруг центральной точки 11 с колебаниями на частоте своего механического резонанса.

Время успокоения и амплитуда возникающих колебаний зеркала 1 (рис. 3) зависят от механических характеристик Тир–Тилт-зеркала. Двухканальный блок электронного демпфирования (демпфер) предназначен для предотвращения возникновения колебаний зеркала 1 (рис. 3) при ступенчатом изменении управляющих сигналов с ЦАП.

На рис. 4 представлена схема блока управления пьезокерамическим приводом.



**Рис. 4.** Схема блока управления пьезокерамическим приводом с электронным демпфером.

Работа блока электронного демпфера при ступенчатом сигнале управления отражена на временной диаграмме (рис. 5а). На рис. 5б приведены результаты измерения углов поворота Тир–Тилт-зеркала на оптическом тракте при минимальных сигналах управления.

Конструктивные решения блока управления и исполнительного устройства (рис. 6) позволяют

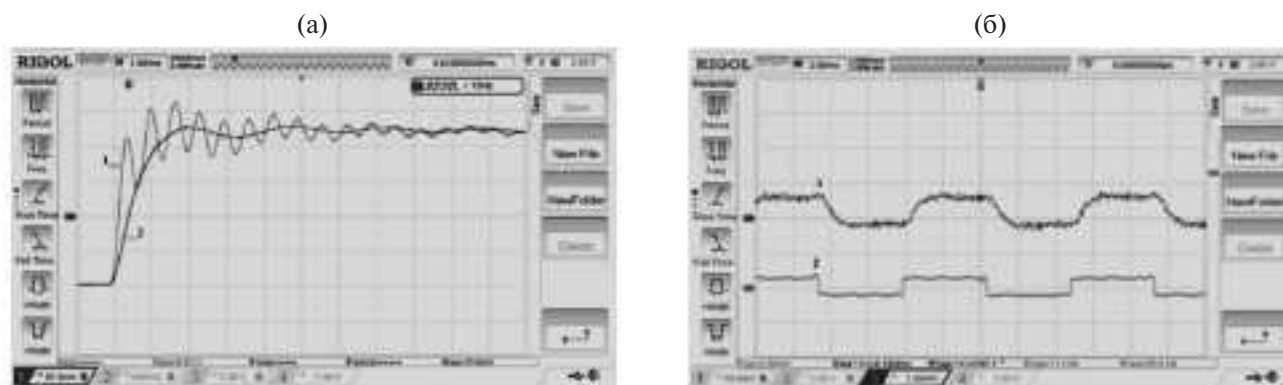


Рис. 5. а — Осциллограмма колебаний плоского зеркала 1 (см. рис. 3) при подаче ступенчатого управляющего сигнала: кривая 1 — без демпфирования, 2 — демпфер включен; б — осциллограмма минимального угла наклона  $0.05''$  оптического пучка (кривая 1), входящий сигнал управления (кривая 2).



Рис. 6. Внешний вид двухкоординатного оптического дефлектора ДП-04.

сохранять плоскостность зеркала 1 (рис. 3) во всем диапазоне корректируемых углов наклона волнового фронта, что необходимо для фазовых измерений.

Технические характеристики Тір–Тілт-зеркала ДП-04: диаметр зеркала корректора 76 мм, угол поворота зеркала  $\pm 115''$ , разрешающая способность по углу  $0.05''$ , максимальная частота управления 1000 Гц, время установления зеркала не более 1 мс, резонансная частота зеркала 1500 Гц, величина гистерезиса не более 4%.

Области применения Тір–Тілт-зеркал серии ДП следующие: адаптивные оптические системы в астрономии, системы видения в турбулентной атмосфере, управление лазерным лучом в оптических системах.

Для расширения сферы применения и повышения точности настройки в оптических схемах Тір–Тілт-зеркало имеет встроенный узел двухко-

ординатной механической высокоточной юстировки по углу наклона с помощью микровинтов.

Тір–Тілт-зеркало ДП-04 максимально адаптировано для работы на экспериментальных исследовательских стендах с целью создания, тестирования алгоритмов и программного обеспечения, например для тестирования алгоритмов, эмулирующих атмосферную турбулентность.

#### 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ОБЩИХ УГЛОВ НАКЛОНА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ТІР–ТІЛТ-ЗЕРКАЛОМ

Чтобы оценить эффективность стабилизации оптического излучения Тір–Тілт-зеркалом, достаточно оценить остаточные ошибки в результате коррекции наклонов, полученных на основе моделирования дрожания изображения оптического излучения в фокальной плоскости системы.

Для модели дрожания оптического пучка на входной апертуре системы использовались общие наклоны волнового фронта, рассчитанные на основе численной модели турбулентности [10], иллюстрируемые общими наклонами случайного фазового экрана в виде профилей Phase, соответствующих данным из строки в двумерном массиве чисел фазового распределения (рис. 7а).

Расчет сигнала обработки Тір–Тілт-зеркалом 4 (см. рис. 1) выполнен при различных значениях поперечной составляющей скорости ветра  $V_x$ , которая задавалась варьированием времени между анализируемыми кадрами.

Из рис. 7б следует, что среднеквадратичная ошибка не превышает 2%, другими словами, значения моделируемых наклонов волнового



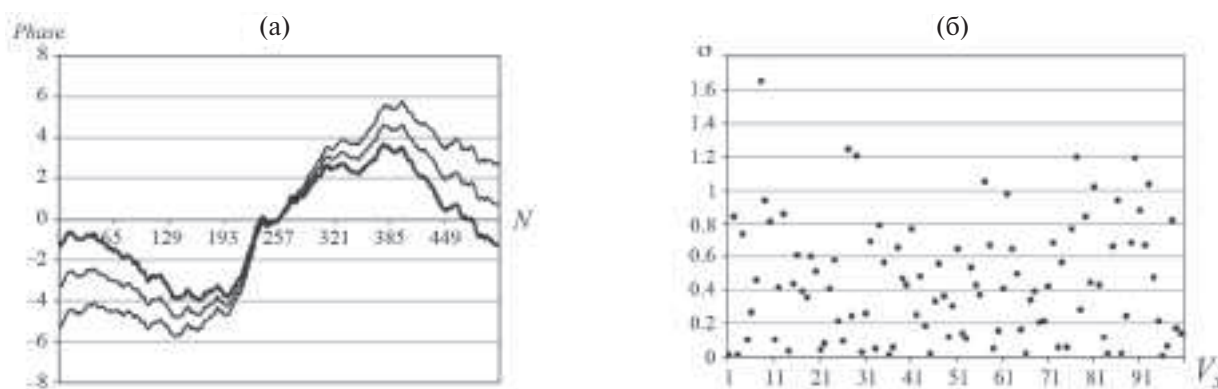


Рис. 7. а — Профиль волнового фронта: кривая 1 соответствует фазовому распределению без общего наклона, 2 — с наклоном  $0.32''$ , 3 — с наклоном  $0.64''$ ; б — среднеквадратичная ошибка между значениями общего наклона волнового фронта, моделируемого Tip-Tilt-зеркалом 3, и значениями корректирующего Tip-Tilt-зеркала 4.

фронта случайного фазового экрана, движущегося под действием ветрового переноса в плоскости входной апертуры системы [10], практически совпадают со значениями углов наклона, представляющих управляющие сигналы для корректирующего Tip-Tilt-зеркала 4 (рис. 1).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная адаптивная оптическая система представляет сегодня двухзеркальную систему адаптивной оптики [2, 3], которая включает в себя стабилизирующий оптическое излучение контур коррекции наклонов [14, 15].

Чтобы оценить эффективность стабилизации оптического излучения корректором наклонов волнового фронта достаточно оценить остаточные ошибки в результате коррекции наклонов, полученных на основе эмуляции атмосферной турбулентности, моделирующей дрожание изображения оптического излучения в фокальной плоскости системы. Эмуляция атмосферной турбулентности представляет многократно повторяющийся неоднородности светового поля инструмент для тестирования оптических элементов. Неоднородности светового поля могут быть смоделированы на основе численной модели турбулентности, а также представлять предварительно измеренные на атмосферной трассе [16] значения.

Новизна проведенных научных исследований подтверждена полученными Патентами РФ на техническую реализацию Tip-Tilt-зеркала и блока эмуляции турбулентной атмосферы в контуре следящей адаптивной оптической системы [14–16].

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: 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. Топоровский В.В., Кудряшов А.В., Самаркин В.В., Рукосуев А.Л., Никитин А.Н., Шелдакова Ю.В., Отрубянникова О.В. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 6. С. 584.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20200903>
5. Ягнятинский Д.А., Федосеев В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 3. С. 220.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20200312>
6. Benton D.M., Ellis A.D., Li Y., Hu Z. // Eng. Res. Exp. 2022. V. 4. № 4. 045004.  
<https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac7d49>
7. Voelz D., Wijerathna E., Muschinski A., Xiao X. // Opt. Eng. 2018. V. 57. № 10. 104102.  
<https://doi.org/10.1117/1.OE.57.10.104102>

8. Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 212.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20190307>
9. Волков М.В., Богачев В.А., Стариков Ф.А., Шнягин Р.А. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 547.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20210710>
10. Goleneva N.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N. // Proceedings of SPIE. 2014. V. 9292. 92921P.  
<https://doi.org/10.1117/12.2075002>
11. Lardière O., Conan R., Clare R., Bradley C., Hubin N. // Applied Optics. 2010. V. 49. № 31. P. G78.  
<https://doi.org/10.1117/12.857742>
12. Ягнятинский Д.А., Ляхов Д.М., Борщевников А.Н., Федосеев В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 949.  
<https://doi.org/10.15372/AOO20161108>
13. Дяченко И.В., Захаров Н.С. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 11. С. 1465.
14. Антошкин Л.В., Борзилов А.Г. Описание полезной модели к патенту № 181 166 РФ // Оpubл. 05.07.2018. Бюл. № 19.
15. Антошкин Л.В., Борзилов А.Г. Патент на изобретение № 2 695 281 РФ // Оpubл. 22.07.2019. Бюл. № 1.
16. Антошкин Л.В., Лавринова Л.Н., Лавринов В.В., Селин А.А., Борзилов А.Г. Описание изобретения к патенту № 2788312 РФ // Оpubл. 17.01.2023. Бюл. № 2.