

УДК 621.371.342; 537.876.23; 535.23

## ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ВКЛЮЧАЮЩАЯ ГЕНЕРАТОР АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И СИСТЕМУ КОРРЕКЦИИ СОЗДАННЫХ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

© 2025 г. А. Л. Рукосуев, А. Г. Александров, А. Н. Никитин\*, В. В. Самаркин, Ю. В. Шелдакова, А. В. Кудряшов

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия*

*\*E-mail: nikitin@idg.ras.ru*

Атмосферная турбулентность вызывает искажения волнового фронта распространяющегося оптического излучения. Это приводит к ухудшению разрешения изображений в астрономических телескопах и значительно снижает плотность мощности излучения на цели при фокусировке. Влияние турбулентных флуктуаций на волновой фронт можно исследовать в лабораторных условиях с использованием деформируемого зеркала в качестве генератора фазовых искажений, а в качестве измерителя искажений волнового фронта – датчика волнового фронта. Мы разработали программный симулятор и экспериментальную установку для генерации фазовых флуктуаций атмосферной турбулентности, а также адаптивную оптическую систему для компенсации вызванных ими аберраций. Обе системы используют биморфные деформируемые зеркала диаметром 60 мм с 92 каналами управления и два корректора наклона. Волновой фронт измеряется с помощью высокоскоростного датчика волнового фронта Шака–Гартмана на базе промышленной CMOS-камеры. Система достигла частоты коррекции 600 Гц, при этом амплитуда аберраций снизилась с 2.6 до 0.3 мкм в процессе коррекции. Применение корректора наклона позволило уменьшить диапазон дрожания центроида фокального пятна в 2–3 раза.

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, спектр Колмогорова, моделирование турбулентности, коррекция волнового фронта, биморфное деформируемое зеркало, датчик волнового фронта Шака–Гартмана, адаптивная оптика.

**Для цитирования:** Рукосуев А.Л., Александров А.Г., Никитин А.Н., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В., Кудряшов А.В. Лабораторная модель адаптивной оптической системы, включающая генератор атмосферной турбулентности и систему коррекции созданных фазовых флуктуаций // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 115–129. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2025\\_17\\_4\\_115](https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_115)

### Введение

Как известно, излучение, распространяющееся через атмосферу, искажается вследствие флуктуаций показателя преломления, вызванных турбулентностью. Это ограничивает разрешающую способность телескопов и снижает когерентность лазерного излучения [Andrews, Phillips, 2005; Nafria et al., 2020; Vorontsov et al., 2010; Weyrauch, Vorontsov, 2010; Lema, 2024]. Атмосферная турбулентность также влияет на скорость беспроводной передачи информации и энергии с помощью светового пучка [Lu et al., 2018; Geoffrey, Landis, 1992]. В частности, она ограничивает каналы оптической связи в свободном пространстве [Wang et al., 2018] и связь со спутниками на низкой околоземной орбите [Geoffrey, Landis, 1992]. Кроме того, она ограничивает возможности по повышению плотности мощности излучения на цели [Soloviev et al., 2022] (например, при лазерной резке) и улучшению точности наведения луча для оптической записи информации.

Проблема деградации волнового фронта вследствие атмосферной турбулентности [Татарский, 1967] изучается уже более 50 лет, но остаётся актуальной. Одним из наиболее эффективных

способов преодоления этой проблемы является применение методов и устройств адаптивной оптики [Воронцов, Шмальгаузен, 1985].

В данной работе представлена реализация полного цикла исследований, включающего численное моделирование, генерацию и коррекцию турбулентных флуктуаций фазы.

Моделирование последовательности фазовых экранов производится на основе статистической теории Колмогорова. Экспериментальная часть выполнена на оптическом стенде, состоящем из двух независимых друг от друга контуров. Первый контур генерирует последовательность фазовых экранов с помощью биморфного зеркала, установленного в управляемой по наклонам карданной оправе. Во втором контуре фазовые искажения, вызванные сгенерированными экранами, компенсируются другим биморфным зеркалом и отдельным корректором наклонов. Данная система позволяет исследовать эффективность деформируемых биморфных зеркал при коррекции флуктуаций атмосферной турбулентности в лабораторных условиях.

### Экспериментальная установка

В предыдущих экспериментах мы использовали вентиляторный нагреватель в качестве устройства для генерации фазовых флуктуаций турбулентности [Belousov et al., 2020]. До начала эксперимента мы измеряли искажения волнового фронта, вызванные вентиляторным нагревателем, и показали, что во многом статистика фазовых флуктуаций близка к колмогоровской [Nikitin et al., 2020]. Однако основной недостаток вентиляторного нагревателя заключается в отсутствии возможности плавного управления параметрами турбулентности – оператор не может задать требуемую скорость ветра, диаметр апертуры или радиус Фрида.

Для преодоления этой проблемы традиционно используются оптические фазовые пластины (ОФП) [Rampy et al., 2012; Oh et al., 2024]. Фазовая пластина – это пассивное оптическое изделие, способное статически воспроизводить требуемые реальные атмосферные условия в лабораторных условиях. Для создания динамических изменений фазы такие пластины укрепляют на валу двигателя и придают им вращение, тем самым имитируя изменение фазового набега. Каждой пластине соответствуют свои фазовые искажения, зависящие от отношения диаметра апертуры пучка к размеру радиуса когерентности, а скорость ветра определяет частоту её вращения.

Ещё более гибкий подход – создание полностью управляемого генератора фазовых искажений волнового фронта, характерных для турбулентности, описываемой статистической теорией Колмогорова (генератора турбулентности) [Gonglewski et al., 1997]. При помощи программного обеспечения формируются фазовые экраны с заданными параметрами, используя модель колмогоровской турбулентности, и далее воспроизводятся корректором волнового фронта, в нашем случае биморфным зеркалом, установленным в управляемой по наклонам оправе.

Оптическая схема и фотография адаптивной системы для генерации и компенсации атмосферной турбулентности представлены на рис. 1.

В качестве источника использовался диодный лазер с волоконным выводом и длиной волны 0.532 мкм, коллимированный ахроматической линзой. Коллимированный лазерный пучок направлялся на первое биморфное деформируемое зеркало диаметром 60 мм с 92 электродами, установленное в кинематическом креплении с возможностью внесения наклона волнового фронта. Эта конструкция позволяет вводить управляемые искажения волнового фронта, эквивалентные в нашем случае тем, которые вызываются атмосферной турбулентностью. Искривлённый пучок проходит через сопрягающий телескоп (две линзы, оптически сопрягающие плоскости двух биморфных зеркал) и падает на второе биморфное деформируемое зеркало диаметром 60 мм с 92 электродами, компенсирующее введённые aberrации. Далее пучок направляется на отдельный корректор наклона, проходит через согласующий телескоп и попадает на датчик волнового фронта Шака–Гартмана, выполненный на базе промышленной CMOS-камеры Baumer VCXU 13M (Германия). Часть пучка отражается от делителя пучка и попадает на CMOS-камеру The Imaging Source DMC 23UX174 (Германия), которая анализирует распределение интенсивности фокального пятна в дальнем поле.

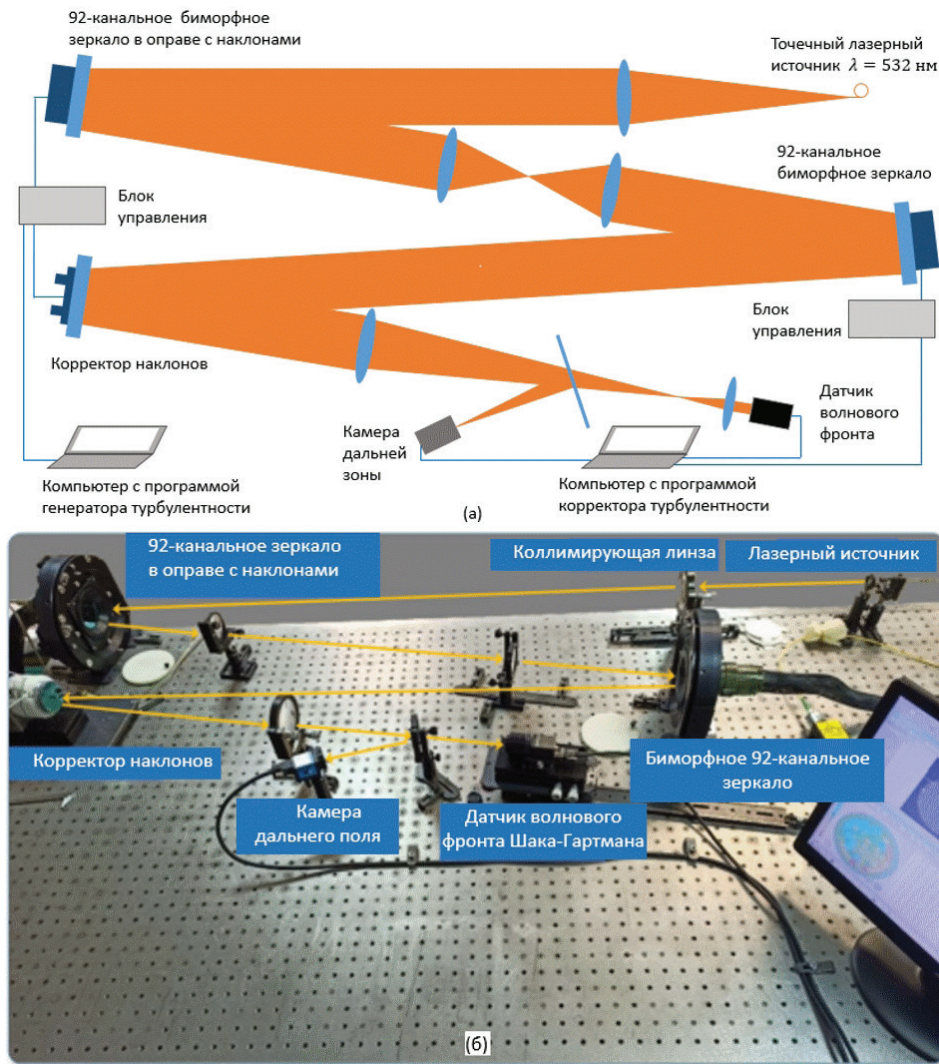


Рис. 1. Оптическая схема (а) и фотография комплексной установки с модулями генерации и коррекции турбулентности (б)

### Биморфное деформируемое зеркало

Наиболее значимыми аберрациями, вызванными турбулентностью, являются наклоны, дефокусировка, астигматизмы и несколько других аберраций низкого порядка. Конечно, искажённый турбулентностью волновой фронт не ограничивается только этими аберрациями — присутствуют и аберрации высоких порядков, однако их вклад значительно меньше по сравнению с аберрациями низких порядков. Биморфные деформируемые зеркала являются корректорами с модальными функциями отклика электродов. Следовательно, они эффективны при воспроизведении и компенсации крупномасштабных аберраций низкого порядка с большой амплитудой [Samarkin et al., 2016]. Правда, нужно отметить, что такой тип зеркал может моделировать и мелкомасштабные аберрации, однако амплитуда их будет достаточно малой [Топоровский и др., 2025].

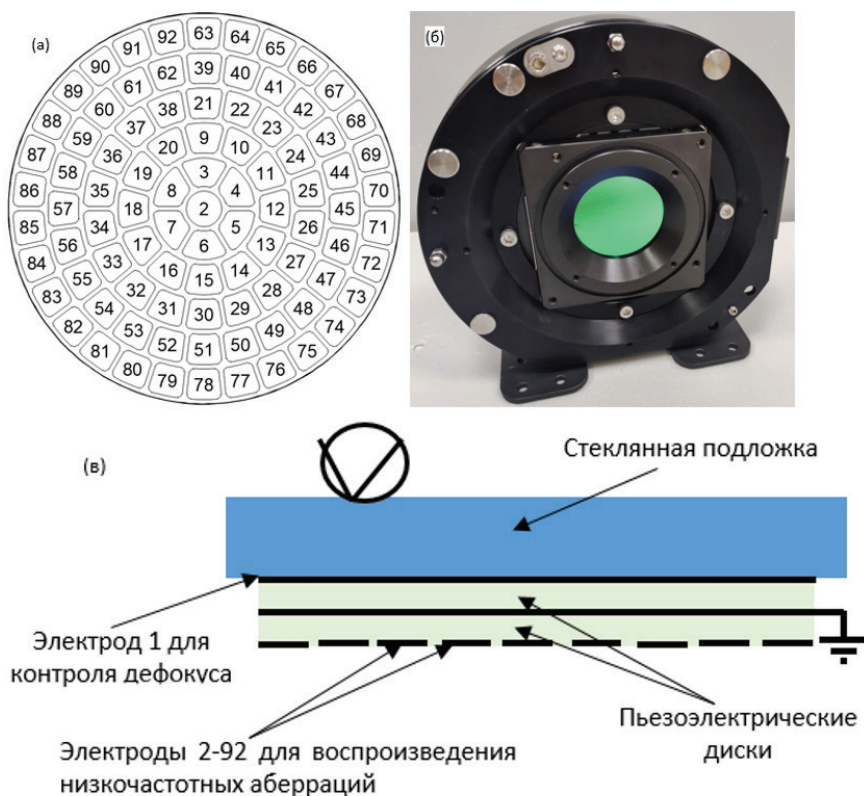
Классическое биморфное деформируемое зеркало состоит из пассивной подложки из стекла или кремния с отражающим покрытием, на которую наклеены два пьезокерамических диска [Kudryashov, Shmalhausen, 1996]. На внутренний пьезокерамический диск нанесён общий (первый) электрод, предназначенный для изменения кривизны отражающей поверхности зеркала. На внешний пьезокерамический диск нанесена сетка управляющих электродов со 2-го по 92-й [Kudryashov et al., 2001]. Конструкционная схема биморфного зеркала, схема размещения электродов и фотография разработанного зеркала представлены на рис. 2, а характеристики зеркала представлены в табл. 1.



Таблица 1.

**Параметры биморфного деформируемого зеркала в креплении с наклоном**

Параметр	Значение
Полезная апертура	60 мм
Материал подложки	ЛК8
Количество пьезокерамик (PZT)	2
Количество управляющих электродов	92
Тип приводов	Пьезокерамические диски
Геометрия приводов	Секторная
Максимальное входное напряжение	от -300 до +500 В
Максимальный диаметр элемента (в креплении с наклоном)	152 мм
Диапазон угловых смещений крепления с наклоном	$\pm 35$ мрад



**Рис. 2.** Схема размещения электродов биморфного зеркала (а); фотография биморфного зеркала в креплении с наклонами (б); принципиальная схема конструкции биморфного зеркала (в)

*Корректор наклона*

Согласно гипотезе Тейлора [Higgins et al., 2012], основная спектральная мощность фазовых флуктуаций в соответствии со статистической теорией Колмогорова сосредоточена в первых нескольких aberrациях низкого порядка: наклонах, дефокусе, астигматизме и коме. При этом на долю aberrаций наклона приходится более 40% спектральной мощности, что подчёркивает необходимость их коррекции.

Нами был изготовлен собственный корректор наклонов, фото и конструкция которого представлена на рис. 3. Для поворота зеркала вокруг каждой оси использовалась пара пьезопроводов. Центральная часть зеркала закреплялась спицей, которая одновременно и притягивала наклоняемую зеркальную

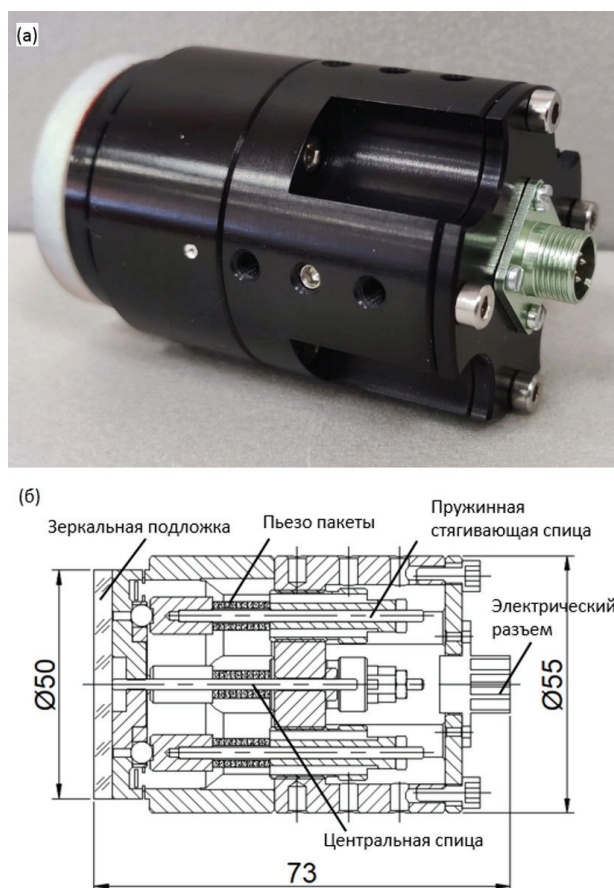


Рис. 3. Фотография (а) и конструктивный чертёж корректора наклона (б)

пластину к управляющим пьезоприводам, и фиксировала её точку вращения. До начала работы данного корректора на все пьезоактюаторы необходимо подать некоторое начальное смещение, равное половине диапазона возможного управляющего напряжения (например, для полного диапазона управляющих напряжений  $0...+150$  В, смещение составит  $+75$  В). Далее для поворота зеркала на противоположные приводы подаётся разнонаправленное напряжение относительно этой начальной точки. Для самих пьезоактюаторов был обеспечен механизм предварительного сжатия с помощью пружинной 2 мм спицы для предотвращения расслоения пьезопакета при движении в обратном направлении (если необходимо не толкать, а тянуть зеркальную пластину). Диапазон изменения наклонов данного зеркала составил  $\pm 0.4$  мрад, частота первого резонанса 50 мм корректора – 2.1 кГц. Основные параметры корректора наклона приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры корректора наклона

Параметр	Значение
Полезная апертура	56 мм
Материал подложки	Кварц
Количество управляющих приводов	4
Диапазон угловых смещений	$\pm 0.4$ мрад
Диапазон напряжений	от 0 до $+180$ В
Частота управления	более 200 Гц
Разрешение	0.02 мкрад
Резонансная частота (без нагрузки)	1.5 кГц
Время шага (без нагрузки)	2 мс
Электрическая ёмкость	7.2 мкФ/ось

### Датчик волнового фронта Шака–Гартмана

Для измерения aberrаций волнового фронта использовался датчик волнового фронта Шака–Гартмана [Александров и др., 2010; Platt, Shack, 2001; Lane, 1992; Neal et al., 2002].

Принцип работы классического датчика Шака–Гартмана заключается в следующем. Волновой фронт падающего света разделяется на множество субапертур с помощью массива микролинз. Массив микролинз представляет собой тонкую плоскую подложку, на которой вытравлен регулярный массив микролинз. Диаметр каждой микролинзы, как правило, составляет от 100 до 300 мкм, а фокусное расстояние  $f$  – от 2 до 8 мм. При прохождении излучения через такой массив на его фокальной плоскости формируется регулярная структура фокальных пятен.

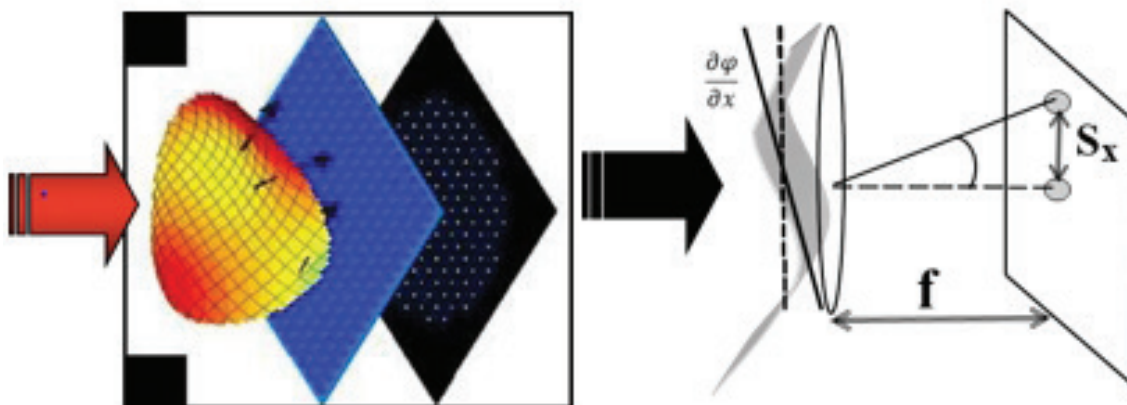


Рис. 4. Принцип работы датчика Шака–Гартмана

Поскольку диаметр каждой микролинзы мал, внутри отдельной микролинзы волновой фронт  $W$  считается плоским и обладающим только наклоном. В отсутствие aberrаций (т.е. при плоском волновом фронте, параллельном плоскости массива микролинз) излучение фокусируется точно в центре соответствующей субапертуры датчика. Если же в пределах микролинзы волновой фронт имеет ненулевой наклон, то фокальное пятно смещается от центра субапертуры пропорционально величине наклона. Таким образом, измерив смещения фокального пятна по осям  $X$  и  $Y$ , можно получить значения соответствующих частных производных волнового фронта в каждой субапертуре (рис. 4).

С другой стороны, для аналитического описания и визуализации поверхности волнового фронта можно использовать полиномиальную аппроксимацию полиномами Цернике [Malacara-Hernandez, 1990; Wyant, Creath, 1992; Genberg et al., 2002; Lakshminarayanan, Fleck, 2011], которые широко применяются в оптике. Таким образом, частные производные волнового фронта можно аналитически выразить через полиномы Цернике.

В итоге получаем переопределённую систему линейных уравнений с неизвестными коэффициентами при полиномах Цернике. Решая задачу методом наименьших квадратов [Линник, 1962], мы находим эти коэффициенты. После этого волновой фронт можно описать аналитически и проанализировать.

Для нашей экспериментальной установки был разработан датчик волнового фронта Шака–Гартмана на базе промышленной CMOS-камеры Baumer VCXU 13M. Эта камера работает со скоростью 222 кадра в секунду при полном разрешении  $1280 \times 1024$  пикселя (1/2 дюйма). Изменяя область интереса (ROI) до  $480 \times 480$  пикселей, удалось увеличить частоту кадров до 1200 Гц, что, в свою очередь, позволило достичь частоты коррекции волнового фронта до 600 Гц в замкнутом контуре. Фотография разработанного датчика волнового фронта представлена на рис. 5, а его параметры приведены в табл. 3

Таблица 3.

Параметры датчика волнового фронта

Параметр	Значение
Сенсор камеры	ON Semiconductor PYTHON 1300
Разрешение камеры, пикселей	1200 × 1024
Время экспозиции, мс	0.02...1000
Размер пикселя, мкм	4.8 × 4.8
Затвор	глобальный
Формат сенсора	1/2"
Скорость камеры в полном разрешении	222 кадров/с
Размер микролинзы линзового раstra, мкм	136 × 136
Фокусное расстояние микролинзы, мм	3.2
Диапазон измеряемых наклонов волнового фронта, градусов	+/- 0.95°
Точность измерения (ско), нм	10

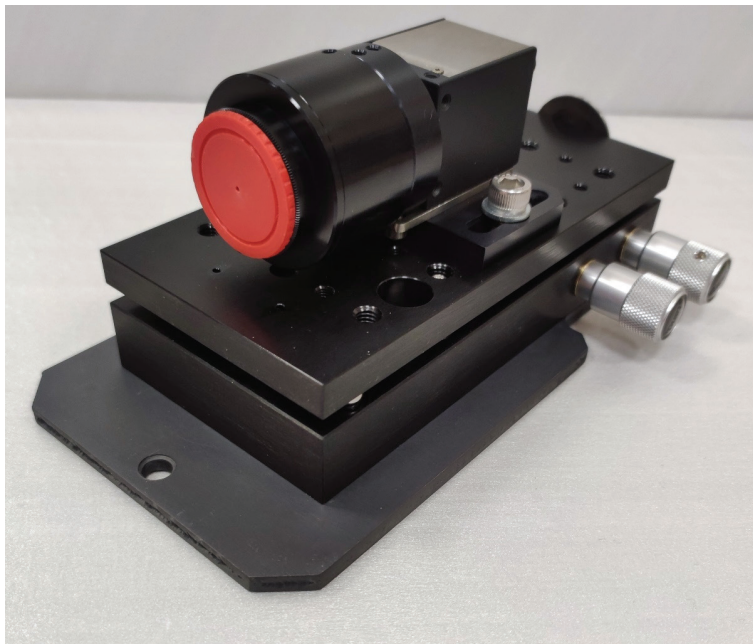


Рис. 5. Фотография датчика волнового фронта Шака–Гартмана на базе CMOS-камеры Baumer VCXU 13M

#### Алгоритм генерации фазовых экранов

Простейшей и наиболее надёжной моделью распространения излучения через турбулентную атмосферу является модель тонкого фазового экрана. Аберрации оптической волны, проходящей через набор таких экранов, аналогичны флуктуациям светового поля в непрерывной случайно-неоднородной среде. Тонкий фазовый экран достаточно точно воспроизводит влияние крупномасштабных атмосферных неоднородностей на характеристики светового поля [Воронцов, Шмальгаузен, 1985]. Подход с использованием фазовых экранов даёт хорошее приближение и в большинстве случаев позволяет с приемлемой точностью воспроизвести влияние турбулентности на волновой фронт.

Сгенерированные нами фазовые экраны «колмогоровской турбулентности» были представлены в виде разложения по полиномам Цернике, после чего был проведен их энергетический анализ. Диаграмма на рис. 6 иллюстрирует вклад каждой моды Цернике в результирующий волновой фронт на основе большого набора смоделированных фазовых экранов.



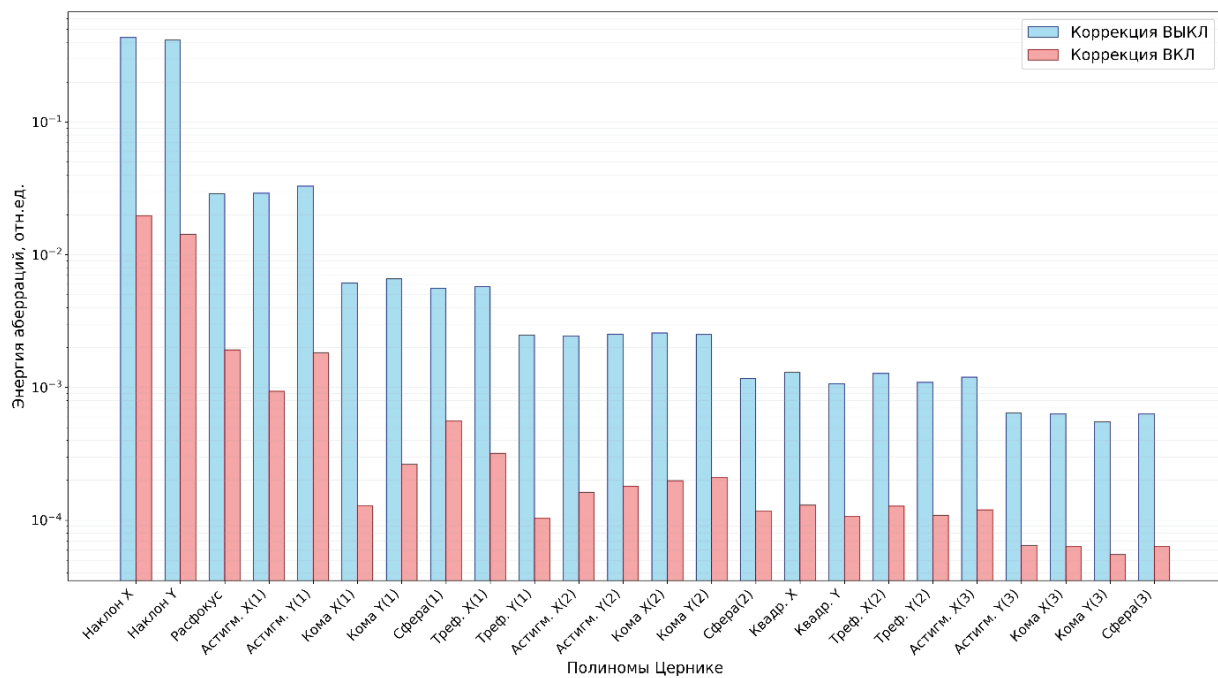


Рис. 6. Распределение энергии по полиномам Цернике в смоделированных турбулентных фазовых экранах

Полученный набор фазовых экранов был аппроксимирован функциями отклика биморфного зеркала [Самаркин и др., 2015], измеренными с помощью датчика волнового фронта Шака–Гартмана.

Для воспроизведения фазового экрана с помощью зеркала использовалась следующая процедура. Производился расчёт производных волнового фронта в каждой субапертуре датчика на основе известной аппроксимации смоделированного фазового экрана полиномами Цернике. По найденным производным вычислялись смещения фокальных пятен, соответствующих производным волнового фронта. Полученные смещения фокальных пятен можно получить, подавая на электроды зеркала необходимые напряжения, для нахождения которых производилось решение переопределённой системы линейных уравнений методом наименьших квадратов. Таким образом вычислялся вектор напряжений, необходимый для воспроизведения фазового экрана.

Процедура повторялась для каждого смоделированного фазового экрана, в результате чего был получен набор векторов напряжений. Каждый вектор соответствует конкретному фазовому экрану, то есть применение этого вектора напряжений к электродам зеркала генерирует волновой фронт, совпадающий с моделированным фазовым экраном. Несколько параметров служат входными для генератора фазовых экранов, основанного на теории Колмогорова, включая диаметр апертуры, радиус Фрида и скорость ветра. Выбор скорости ветра влияет на степень различия между последовательно сгенерированными фазовыми экранами: при увеличении скорости ветра различия между экранами становятся более выраженными, и экраны выглядят всё менее похожими друг на друга.

Основным параметром, характеризующим интенсивность атмосферной турбулентности, является параметр структуры показателя преломления  $C_n^2$  [Burger et al., 2008]: чем больше значение  $C_n^2$ , тем сильнее турбулентность. Этот параметр может изменяться от  $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$  при слабой турбулентности до  $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$  при очень сильной атмосферной турбулентности. Радиус когерентности  $r_0$  связан с  $C_n^2$  и длиной трассы, вдоль которой распространяется излучение, известной формулой:

$$r_0 = 3.02(C_n^2 L k^2)^{-3/5},$$

где  $L$  – длина горизонтальной трассы,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число ( $\lambda = 532 \text{ нм}$ , длина волны).



Наши экспериментальные измерения параметра  $C_n^2$  в Геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН, а также в условиях лесного массива в Подмоскowie показали некоторый разброс значений от  $3.7 \times 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$  до  $2.2 \times 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  в зависимости от времени года. Таким образом, для длины волны 532 нм радиус когерентности на расстояниях порядка 2 км варьировался от 1.18 до 0.4 см. Измерения проводились на приёмной апертуре  $D = 60$  мм. То есть отношение  $D/r_0$  в случае наших экспериментов составляло 5–15. В данной работе при моделировании турбулентных фазовых экранов мы задали отношение  $D/r_0 = 10$ , длину волны  $\lambda = 0.532$  мкм и скорость ветра  $v = 6$  м/с.

### *Коррекция сгенерированной турбулентности*

Одновременно с модулем генерации турбулентности использовалась и наша традиционная система коррекции aberrаций лазерного пучка [Кудряшов и др., 2012]. Оба модуля имели регулируемые частоты, что позволяло независимо управлять частотой генерации турбулентных фазовых экранов и частотой коррекции.

Коррекция сгенерированной турбулентности происходит следующим образом. Измеряются искажения волнового фронта в реальном времени с помощью датчика волнового фронта Шака–Гартмана. Далее в реальном времени вычисляется массив управляющих напряжений для биморфного деформируемого зеркала и корректора наклона. Далее набор этих напряжений подаётся на исполнительные элементы (биморфное зеркало и корректор наклонов), что приводит к компенсации измеренных искажений. Понятно, что пьезокерамика обладает некоторым гистерезисом. Это несколько тормозит процесс коррекции – полное исправление aberrаций достигается не за одну, а за 2–3 итерации. Однако в целом это не сильно влияет на конечный результат, т.к. остаточная ошибка после уже первого шага составляет несколько процентов и вполне сравнима с общей ошибкой коррекции волнового фронта.

Учитывая, что частота коррекции ограничена скоростью работы всей адаптивной системы – 600 Гц, максимальная частота турбулентности, которую можно эффективно скорректировать, составляет менее 60 Гц [Рукоусев и др., 2015].

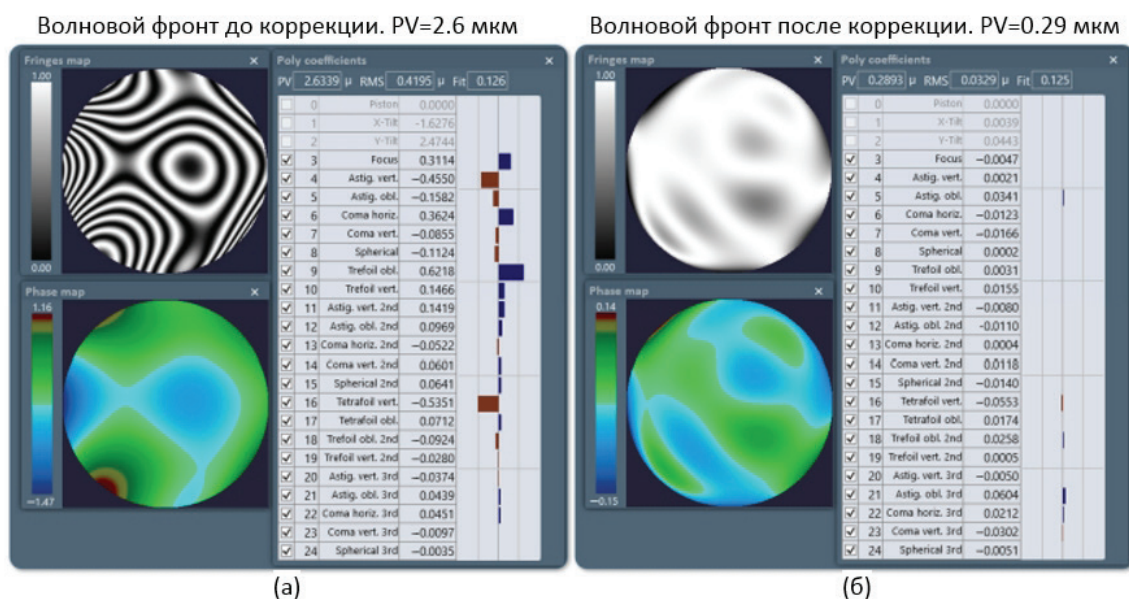
## **Основные результаты**

В результате работы данной системы амплитуда остаточных aberrаций волнового фронта после включения режима коррекции составляла от 0.25 до 0.35 мкм, тогда как начальная амплитуда находилась в диапазоне 2.5–2.8 мкм. Пример волнового фронта до и после коррекции приведён на рис. 7.

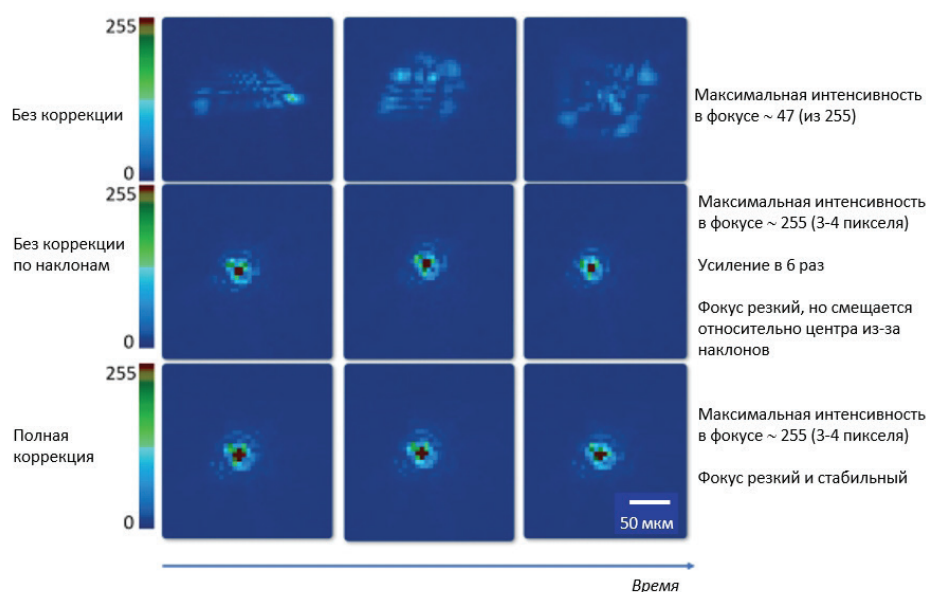
Важно подчеркнуть, что были значительно снижены не только общие коэффициенты Цернике, такие как дефокусировка, астигматизм и др., но и компоненты наклона. В частности, значения наклонов уменьшились с -1.62 и 2.47 мкм до 0.004 и 0.04 мкм соответственно, именно благодаря использованию отдельного корректора.

Значимость корректора наклона наглядно демонстрируется на рис. 8. Первая строка рис. 8 содержит изображения фокального пятна в дальнем поле, полученные видеокамерой при работающем генераторе турбулентности и в отсутствие коррекции. Видно, что фокальное пятно сильно размыто, видна некоторая спекл-структура: максимальная интенсивность (выраженная в оттенках серого) составляет всего 47 из 255.

Вторая строка рис. 8 демонстрирует изображения фокального пятна при активированном модуле коррекции, использующем биморфное зеркало для компенсации искажений волнового фронта, при этом корректор наклона остаётся выключенным. Наблюдается заметное улучшение распределения интенсивности фокального пятна: пиковая интенсивность возросла в шесть раз (достигла 255, с 3–4 пересвеченными пикселями). Однако, несмотря на это, фокальное пятно в дальней зоне остаётся нестабильным – оно смещается в плоскости фокусировки. Этот эффект проиллюстрирован на рисунке: фокальное пятно не центрировано.



**Рис. 7.** Волновой фронт, соответствующий сгенерированному турбулентному фазовому экрану (а) и волновой фронт после коррекции с использованием биморфного зеркала совместно с корректором наклона (б). Термин PV обозначает «пик–впадина» (*peak-to-valley*) и представляет амплитуду волнового фронта в микрометрах, а RMS – среднеквадратичную ошибку (*root mean square error*) в микрометрах



**Рис. 8.** Стабилизация фокального пятна в дальнем поле с коррекцией наклона и без неё. Используемая цветовая палитра носит иллюстративный характер. Исходные данные представлены в 8-битном формате (256 оттенков серого)

Третья строка рис. 8 показывает изображения фокального пятна при одновременно включённых двух модулях коррекции: биморфное зеркало корректирует искажения волнового фронта, а корректор наклона компенсирует aberrации наклона. В этом случае смещений фокального пятна в дальней зоне не наблюдалось, что привело к формированию чёткого и стабильного фокального пятна.

На рис. 9 представлены графики дрожания центроида фокального пятна в дальнем поле до коррекции, во время коррекции только биморфным зеркалом и при совместной работе биморфного зеркала и корректора наклона. Частота воспроизведения турбулентных фазовых экранов генератором турбулентности была установлена на уровне 20 Гц. Оранжевая пунктирная кривая – смещения центроида при отключённой коррекции и активном генераторе турбулентности. Синяя штриховая кривая – смещения центроида при работе только биморфного зеркала. Зелёная сплошная кривая – смещения центроида при одновременной работе биморфного зеркала и корректора наклона.

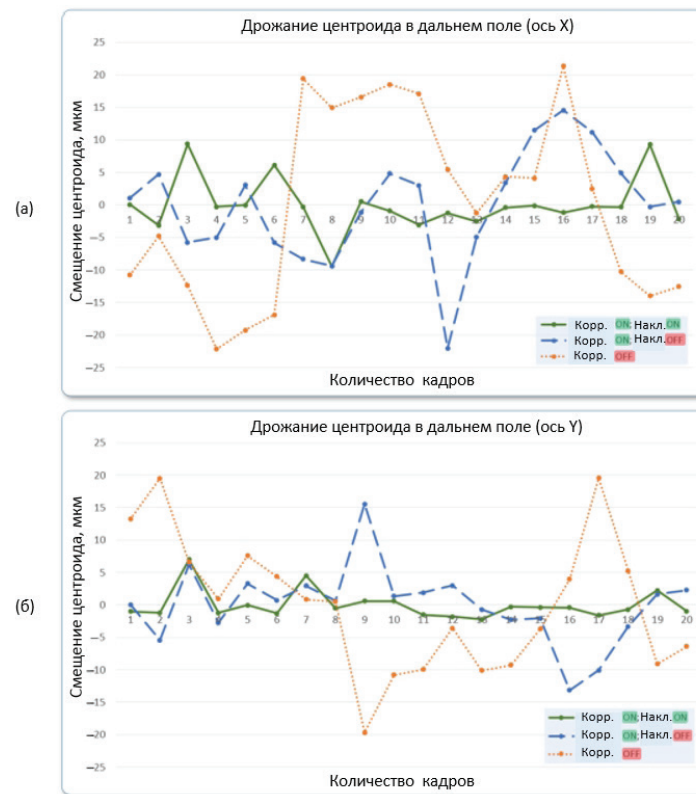


Рис. 9. Графики дрожания центроида фокального пятна в дальнем поле по (а) оси  $X$  и (б) оси  $Y$

При работающем генераторе турбулентности амплитуда смещений центроида фокального пятна в дальнем поле составляла 53 мкм по оси  $X$  и 48 мкм по оси  $Y$ . Во время коррекции только биморфным зеркалом (без корректора наклона) амплитуда смещений фокального пятна уменьшилась до 45 мкм по оси  $X$  и 35 мкм по оси  $Y$ . Однако при одновременной работе биморфного зеркала и корректора наклона амплитуда смещений фокального пятна снизилась в 2–4 раза, достигнув значений 23 мкм по оси  $X$  и 11 мкм по оси  $Y$ . То есть, с учетом того, что для получения изображения в дальней зоне использовалась линза с фокусным расстоянием 500 мм, наклоны, сгенерированные фазовыми экранами составляли 96...106 мкрад. После коррекции их удалось уменьшить до 22...46 мкрад.

Размер пикселя сенсора камеры равнялся 5.86 мкм. Это означает, что центроид фокального пятна смещается в пределах примерно 2 пикселей во время процедуры коррекции. Причиной этого является недостаточная частота функционирования корректора наклона – возможно требуется модификация его крепления в юстировочной оправе, поскольку при увеличении рабочей частоты до 300 Гц в режиме коррекции наблюдались дополнительные вибрации. Также проблема связана и с самой компьютерной программой управления процессом коррекции, которая работает под операционной системой Windows – в определённые моменты сама система Windows некорректно расставляет приоритеты, что приводит к торможению всей работы. В целом, такие задержки могут совпадать с моментами создания новых фазовых экранов генератором турбулентности. А это также приводит к смещениям фокального пятна. Именно этого недостатка была лишена разработанная нам ранее быстрая адаптивная система с использованием ПЛИС для управления биморфным корректором [Kudryashov et al., 2020].

## Выводы

Подводя итог, в данном исследовании нам удалось успешно реализовать модель имитации фазовых флуктуаций колмогоровской турбулентности. Мы разработали и собрали экспериментальную установку для генерации фазовых экранов в реальном времени, а также оптическую систему

для коррекции волнового фронта. Кроме того, нами был разработан алгоритм и программное обеспечение, способные восстанавливать последовательности фазовых экранов в реальном времени с использованием функций отклика биморфного зеркала, установленного в кинематическом креплении с возможностью внесения наклона.

Созданный нами управляемый генератор искажений волнового фронта позволил в реальном времени создавать фазовые экраны с заранее заданными параметрами, включая скорость ветра, диаметр апертуры и радиус Фрида. В наших экспериментах параметры были установлены следующим образом: отношение  $D/r_0 = 10$ , длина волны  $\lambda = 0.532$  мкм, скорость ветра  $v = 6$  м/с. Параметр структуры показателя преломления  $C_n^2$  варьировался приблизительно от  $3.6 \times 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$  до  $2.2 \times 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  для протяжённостей трасс от 500 до 3000 м. Сгенерированные искажения волнового фронта имели частоту 20 Гц и амплитуды в диапазоне от 2.4 до 2.8 мкм.

Адаптивная оптическая система работала с частотой замкнутого контура 600 Гц и успешно снизила амплитуды искажений волнового фронта до значения всего 0.3 мкм. В ходе процедуры коррекции с использованием как биморфного зеркала, так и корректора наклона, дрожание центроида фокального пятна в дальнем поле уменьшилось в 2.5–4 раза по сравнению с режимом без коррекции, а пиковая интенсивность фокального пятна возросла в шесть раз.

### Финансирование

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (тема № 125012400749-3) и финансовой поддержке РНФ (проект № 25-19-00701).*

### Благодарности

Авторы благодарят В.В. Топоровского за помощь в организации экспериментов и И. В. Галактионова за компьютерное оформление полученных результатов.

### Список литературы

- Александров А., Завалова В., Кудряшов А., Рукосуев А., Шелдакова Ю., Самаркин В., Романов П. Датчик волнового фронта Шака–Гартмана для измерения параметров мощных импульсных твердотельных лазеров // Квант. Электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 321–326. <https://www.elibrary.ru/ttfgpf>
- Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М. : Наука. 1985. – 336 с.
- Кудряшов А., Самаркин В., Шелдакова Ю., Александров А. Анализ способа компенсации волнового фронта при использовании датчика Шака–Гартмана как элемента адаптивной оптической системы // Автометрия. 2012. Т. 48. № 2. С. 52–56. <https://www.elibrary.ru/oxztyj>
- Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М. : Физматгиз. 1962. – 349 с.
- Рукосуев А., Кудряшов А., Лылова А., Самаркин В., Шелдакова Ю. Адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта в реальном времени // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 381–386.
- Самаркин В., Александров А., Джитсуно Т., Романов П., Рукосуев А., Кудряшов А. Исследование широкоапертурного комбинированного деформируемого зеркала для мощного импульсного лазера на фосфатном стекле // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 12. С. 1086–1087. <https://www.elibrary.ru/vqoprl>
- Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной среде. М. : Наука. 1967. – 548 с.
- Топоровский В., Галактионов И., Абдулразак С., Кудряшов А. Оценка эффективности компенсации искажений волнового фронта пьезоэлектрическими деформируемыми зеркалами с высоким пространственным разрешением управляющих элементов путем воспроизведения ортогональных полиномов Цернике // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 1. С. 3–12. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-01-3-12>
- Andrews L.C., Phillips R.L. Laser Beam Propagation Through Random Media. 2nd ed. SPIE Press. Bellingham. WA. USA. 2005. – 782 p. <https://doi.org/10.1117/3.626196>
- Belousov V., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Otrubyanikova O., Rukosuev A., Samarkin V., Sivertceva I., Sheldakova J. Adaptive optical system for correction of laser beam going through turbulent atmosphere. Proc. SPIE. 2020. Vol. 11560. P. 1156026. <https://doi.org/10.1117/12.2575650>



- Burger L., Litvin I., Forbes A. Simulating atmospheric turbulence using a phase-only spatial light modulator // S. Afr. J. Sci. 2008. Vol. 104. P. 129–137.
- Genberg V., Michels G., Doyle K. Orthogonality of Zernike polynomials. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4771. P. 276–287. <https://doi.org/10.1117/12.482169>
- Geoffrey A., Landis H. Laser beamed power – Satellite demonstration applications. In: Proceedings of the 43rd International Astronautical Congress. Washington DC. USA. 1992. 28 August–5 September.
- Gonglewski J., Kudryashov A., Browne S., Highland R. Liquid crystal phase modulators for time varying phase distortion simulations: Aerospace Remote Sensing Conf. Technical Programme (Sept. 22–26, London). 1997. P. 50. <https://doi.org/10.1364/NAO.1997.TuB.3>
- Higgins C.W., Froidevaux M., Simeonov V., Vercauteren N., Barry C., Parlange M.B. The Effect of Scale on the Applicability of Taylor's Frozen Turbulence Hypothesis in the Atmospheric Boundary Layer // Bound.-Layer Meteorol. 2012. Vol. 143. P. 379–391. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9701-1>
- Kudryashov A., Rukosuev A., Nikitin A., Galaktionov I., Sheldakova J. Real-time 1.5 kHz adaptive optical system to correct for atmospheric turbulence // Opt. Express. 2020. Vol. 28 (25). P. 37546–37552. <https://doi.org/10.1364/OE.409201>
- Kudryashov A., Samarkin V., Aleksandrov A. Adaptive optical elements for laser beam control. Proc. SPIE. 2001. Vol. 4457. P. 170–178. <https://doi.org/10.1117/1.601044>
- Kudryashov A., Shmalhausen V. Semipassive bimpoph flexible mirrors for atmospheric adaptive optics applications // Opt. Eng. 1996. Vol. 35 (11). P. 3064–3073. [https://doi.org/10.1142/9789812817815\\_0030](https://doi.org/10.1142/9789812817815_0030)
- Lakshminarayanan V., Fleck A. Zernike polynomials: A guide // J. Mod. Opt. 2011. Vol. 58. P. 545–561. <https://doi.org/10.1080/09500340.2011.633763>
- Lane R.G. Wave-front reconstruction using a Shack–Hartmann sensor // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. P. 6902. <https://doi.org/10.1364/AO.31.006902>
- Lema G. Free space optics communication system design using iterative optimization // J. Opt. Commun. 2024. Vol. 44. P. s1205–s1216. <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0007>
- Lu M., Bagheri M., James A.P., Phung T. Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 29865–29884. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841376>
- Malacara-Hernandez D. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle // Opt. Eng. 1990. Vol. 29. P. 672–675.
- Nafria V., Han X., Djordjevic I. Improving free-space optical communication with adaptive optics for higher order modulation. In: Proceedings of the Optics and Photonics for Information Processing XIV. 2020. Online. CA. USA (24 August–4 September 2020). <https://doi.org/10.1117/12.2568713>
- Neal D.R., Copland J., Neal D. Shack–Hartmann wavefront sensor precision and accuracy. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4779. P. 148–160. <https://doi.org/10.1117/12.450850>
- Nikitin A., Starikov F., Volkov M., Bogachev V., Khlebnikov A., Rukosuev A. Dynamic correction of the laser beam distortion by 2000 Hz FPGA-based adaptive optical system. Proc. SPIE. 2020. Vol. 11506. P. 1150607. <https://doi.org/10.1117/12.2569338>
- Oh H.-G., Kang P., Lee J., Rhee H.-G., Ghim Y.-S., Lee J.H. Fabrication of Phase Plate to Simulate Turbulence Effects on an Optical Imaging System in Strong Atmospheric Conditions // Curr. Opt. Photonics. 2024. Vol. 8. P. 259–269. <https://doi.org/10.3807/COPP.2024.8.3.259>
- Platt B., Shack R.J. History and principles of Shack–Hartmann wavefront sensing // Refr. Surg. 2001. Vol. 17. P. 15. <https://doi.org/10.3928/1081-597X-20010901-13>
- Rampy R., Gavel D., Dillon D., Thomas S. Production of phase screens for simulation of atmospheric turbulence // Appl. Opt. 2012. Vol. 51. P. 8769–8778. <https://doi.org/10.1364/AO.51.008769>
- Samarkin V., Alexandrov A., Borsoni G., Jitsuno T., Romanov P., Rukosuev A., Kudryashov A. Wide aperture piezoceramic deformable mirrors for aberration correction in high-power lasers // High Power Laser Science and Engineering. 2016. Vol. 4. P. e4. <https://doi.org/10.1017/hpl.2016.3>
- Soloviev A., Kotov A., Martyanov M., Perevalov S., Zemskov R., Starodubtsev M., Alexandrov A., Galaktionov I., Samarkin V., Kudryashov A. et al. Improving focusability of post-compressed PW laser pulses using a deformable mirror // Opt. Express. 2022. Vol. 30. P. 40584–40591. <https://doi.org/10.1364/OE.471300>
- Vorontsov M., Weyrauch T., Carhart G., Beresnev L. Adaptive Optics for Free Space Laser Communications. In: Lasers, Sources and Related Photonic Devices. OSA Technical Digest Series (CD). Optica Publishing Group: Washington. DC. USA. 2010. P. LSMA1. <https://doi.org/10.1364/LSC.2010.LSMA1>

*Wang R., Wang Y., Jin C., Yin X., Wang S., Yang C., Cao Z., Mu Q., Gao S., Xuan L.* Demonstration of horizontal free-space laser communication with the effect of the bandwidth of adaptive optics system // Opt. Commun. 2018. Vol. 431. P. 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.09.038>

*Weyrauch T., Vorontsov M.* Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments // J. Optic. Comm. Rep. 2010. Vol. 1. P. 355–379. <https://doi.org/10.1007/s10297-005-0033-5>

*Wyant J.C., Creath K.* Basic wavefront aberration theory for optical metrology // Applied Optics and Optical Engineering. 1992. Vol. 11. P. 1–53.

## **A LABORATORY MODEL OF AN ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM, COMPRISING AN ATMOSPHERIC TURBULENCE GENERATOR AND A SYSTEM FOR CORRECTING THE INDUCED PHASE FLUCTUATIONS**

**© 2025 A. L. Rukosuev, A. G. Alexandrov, A. N. Nikitin\*, V. V. Samarkin,  
J. V. Sheldakova, A.V. Kudryashov**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail: nikitin@idg.ras.ru*

Atmospheric turbulence causes distortions in the wavefront of propagating optical radiation. This leads to a degradation of image resolution in astronomical telescopes and significantly reduces the power density of radiation on the target when focusing. The influence of turbulent fluctuations on the wavefront can be studied in laboratory conditions using a deformable mirror as a phase fluctuations generator and a wavefront sensor as a distortion measurer. We have developed a software simulator and an experimental setup for generating atmospheric turbulence phase fluctuations, as well as an adaptive optical system to compensate for the induced aberrations. Both systems use 60-mm diameter bimorph deformable mirrors with 92 control channels and two tip-tilt correctors. The wavefront is measured using a high-speed Shack-Hartmann wavefront sensor based on an industrial CMOS camera. The system achieved a correction frequency of 600 Hz, reducing the aberration amplitude from 2.6  $\mu\text{m}$  to 0.3  $\mu\text{m}$  during the correction process. The application of the tip-tilt corrector reduced the range of focal spot centroid jitter by a factor of 2–3.

**Keywords:** atmospheric turbulence, Kolmogorov spectrum, turbulence modeling, wavefront correction, bimorph deformable mirror, Shack–Hartmann wavefront sensor adaptive optics.