

Адаптивная оптика реального времени для коррекции лазерного излучения в условиях сильной турбулентности

А.Л. Рукоусев¹, А.Н. Никитин¹, И.В. Галактионов¹, Ю.В. Шелдакова¹, А.В. Кудряшов^{1,2}

¹ Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН,
119334, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корпус 1;

² Московский политехнический университет,
107023, Россия, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38

Аннотация

Представлена комбинированная адаптивная оптическая система, предназначенная для коррекции волнового фронта светового излучения, искаженного воздействием сильной атмосферной турбулентности. Система состоит из стабилизатора положения пучка в пространстве и быстрой адаптивной оптической системы, работающей в режиме реального времени. Стабилизация положения пучка в пространстве осуществляется с помощью двух электронно управляемых по наклонам зеркал. Контур управления включает в себя два разнесенных в пространстве квадрантных датчика и программируемую логическую интегральную схему, которая осуществляет замыкание контура обратной связи. Адаптивное зеркало на основе биморфного пьезоэлемента, управляемое с помощью другой программируемой логической интегральной схемы, на основе информации, получаемой с датчика Шака–Гартмана, позволяет компенсировать аберрации волнового фронта вплоть до 23 полинома Цернике в реальном масштабе времени. Испытания системы проводились в условиях лабораторной турбулентности, созданной с помощью тепловентилятора. Ширина полосы возмущающего воздействия искусственной турбулентности в экспериментах не превышала 100 Гц, что соответствует среднестатистическому состоянию реальной атмосферы. Представлены результаты коррекции волнового фронта, искаженного воздействием искусственной турбулентности. Показано, что при использовании только биморфного корректора амплитуда наклонов волнового фронта возрастает. Это представляет определенную проблему, поскольку значительная часть энергии турбулентности приходится на наклоны волнового фронта. Для ее решения предлагается дополнительно использовать систему стабилизации положения светового пучка в пространстве.

Ключевые слова: адаптивная оптическая система, атмосферная турбулентность, корректор волнового фронта, полиномы Цернике, компьютерная оптика.

Цитирование: Рукоусев, А.Л. Адаптивная оптика реального времени для коррекции лазерного излучения в условиях сильной турбулентности / А.Л. Рукоусев, А.Н. Никитин, И.В. Галактионов, Ю.В. Шелдакова, А.В. Кудряшов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 4. – С. 511-518. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1352.

Citation: Rukosuev AL, Nikitin AN, Galaktionov IV, Sheldakova JV, Kudryashov AV. Real-time adaptive optics for high-power laser beam correction in the strong turbulence. *Computer Optics* 2024; 48(4): 511-518. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1352.

Введение

Исследование параметров атмосферы становится особенно актуально в связи с появлением различного рода систем, использующих в своей работе лазерное излучение. В связи с очень быстрым развитием и внедрением в жизнь современных беспилотных летательных аппаратов проблема передачи энергии лазерных пучков в условиях наличия атмосферной турбулентности становится особенно актуальной. Тут нужно отметить и задачи обеспечения коммуникации с беспилотными летательными аппаратами [1, 2, 3], включая низкоорбитальные спутники [4]. Также хорошо известно о необходимости «борьбы» с атмосферными помехами в задачах передачи криптографически защищённой беспроводной информации в турбулентной и рассеивающей среде [5–12], а также

организации оптических каналов связи в свободном пространстве [13, 14] и даже в разрабатываемых современных системах уничтожения космического мусора [15–17].

При прохождении лазерного луча сквозь турбулентную атмосферу Земли качество волнового фронта ухудшается, что приводит к ограничениям в работе различных систем и, в частности, даже невозможности сфокусировать лазерное излучение на объекте [18–30]. На сегодня, пожалуй, единственным методом решения данной проблемы является использование адаптивной оптической системы (АОС), позволяющей корректировать волновой фронт в реальном масштабе времени [31]. Задачи увеличения дальности распространения лазерного излучения сквозь атмосферу с применением методов адаптивной оптики решаются научными коллективами из России, Индии,

Франции, США, Австралии и др. [32–36]. Основным требованием к адаптивной оптической системе является частота коррекции. Поскольку, согласно [37] или [38], при некоторых «стандартных» погодных условиях частота изменений волнового фронта лазерного излучения, искаженного турбулентной атмосферой, редко превышает 100 Гц, скорость работы дискретной адаптивной оптической системы должна быть не менее 1 кГц [39].

Данная работа посвящена исследованию адаптивной оптической системы, созданной для компенсации фазовых флуктуаций, вызванных атмосферной турбулентностью, для её дальнейшего использования в системах передачи лазерного излучения вдоль горизонтальных или наклонных трасс. Использование лазерной трассы, работающей в реальных атмосферных условиях, достаточно затратно и трудоемко. Поэтому исследования были проведены на примере турбулентности, созданной в лабораторных условиях.

1. Система стабилизации положения пучка

Для эффективной коррекции искажений светового пучка, распространяющегося сквозь атмосферу, необходимо оценить степень воздействия турбулентности на излучение. Как показано, например, в работе [40], распределение энергии по полиномам Цернике имеет вид, представленный на рис. 1.

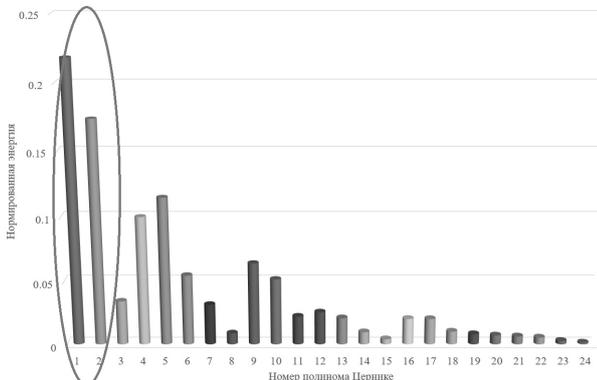


Рис. 1. Распределение энергии по полиномам Цернике

Нумерация полиномов Цернике выполнена согласно ГОСТ Р 8.745–2011 [41, 42]. Видно, что существенный вклад в состав aberrаций волнового фронта вносят наклоны (полиномы Цернике номер 1 и 2), на долю которых приходится почти 40% всей энергии турбулентности.

Для коррекции наклонов предлагается использовать систему стабилизации положения пучка в пространстве, использующую два управляемых по наклонам зеркала. Положение пучка в пространстве измеряется с помощью двух квадрантных датчиков типа ФД-22-133К. Схема устройства показана на рис. 2.

Работа системы основана на том, что через две точки в пространстве можно провести только одну прямую линию. В данной конфигурации в качестве таких точек выступают центры датчиков положения

пучка 1 и 2, через которые должен проходить световой пучок после проведения коррекции. Входящий световой пучок отражается от корректора наклонов 1 в направлении центра корректора наклонов 2, после чего направляется на датчики положения пучка. Также необходимо совмещение прямой линии, образованной центрами датчиков, с центром второго корректора наклонов, что достигается соответствующей юстировкой оптической части. Корректор наклонов 1 может располагаться более-менее произвольно, в его задачу входит направление входящего светового пучка в центр корректора наклонов 2.

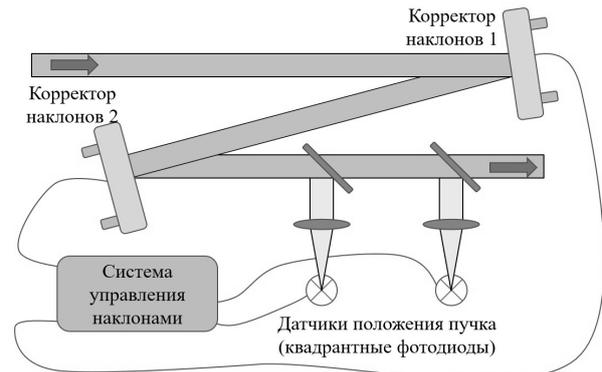


Рис. 2. Схема устройства стабилизации положения пучка в пространстве

Схема расположения и геометрические размеры светочувствительных площадок датчика представлены на рис. 3.

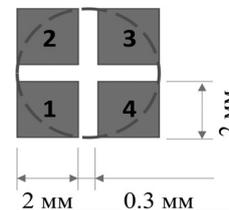


Рис. 3. Схема светочувствительных элементов квадрантного датчика

Пунктирной линией показано оптимальное расположение светового пучка, обеспечивающего наибольшую линейность датчика во всем диапазоне. Проверка линейности отклика квадрантного датчика осуществлялась при помощи математического моделирования. Предполагалось, что амплитуда отклика каждого сектора датчика пропорциональна площади, покрываемой световым пучком. Моделирование проводилось для разных диаметров светового пучка, результаты моделирования представлены на рис. 4.

Координаты пучка вычисляются по следующим формулам:

$$x = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) / (I_1 + I_2 + I_3 + I_4), \tag{1}$$

$$y = (I_2 + I_3) - (I_1 + I_4) / (I_1 + I_2 + I_3 + I_4), \tag{2}$$

где $I_1 \div I_4$ – интенсивность сигнала соответствующего сектора датчика, x и y – нормированные координаты светового пучка в диапазоне $(-1 \div +1)$.

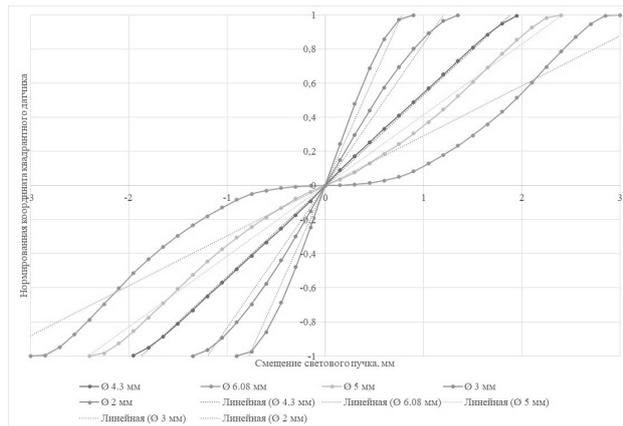


Рис. 4. Выходные характеристики квадрантного фотодиода в зависимости от диаметра пучка

Нормирование на сумму интенсивностей всех секторов датчика позволяет избежать зависимости координат светового пучка от изменяющегося уровня интенсивности.

Из рассмотрения графиков (рис. 4) видно, что наибольшая линейность квадрантного датчика во всем диапазоне смещений получается при диаметре светового пучка, равном размеру светочувствительных площадок плюс ширина зазора между площадками – 4,3 мм. В оптической схеме требуемый диаметр пучка достигается с помощью использования масштабирующих фокусирующих линз и подбора расстояния между линзой и датчиком (рис. 2).

Достаточно большие размеры светочувствительных площадок были выбраны для того, чтобы максимально исключить дифракционные эффекты дальней зоны светового пучка (распределения интенсивности в фокусе масштабирующей линзы).

Управление зеркалами можно осуществлять с помощью алгоритма, основанного на функциях отклика (ФО) корректоров наклонов. Использование функций отклика позволяет автоматически учесть такие параметры системы, как чувствительность актюаторов корректоров наклонов, расстояния от корректоров до датчиков положения светового пучка, неточность ориентации корректоров и датчиков по линиям вертикаль-горизонталь (поворот относительно оси пучка), т.е. фактически провести калибровку всей системы. Для использования функций отклика можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = a_{11} \cdot Vx_1 + a_{12} \cdot Vy_1 + a_{13} \cdot Vx_2 + a_{14} \cdot Vy_2 \\ y_1 = a_{21} \cdot Vx_1 + a_{22} \cdot Vy_1 + a_{23} \cdot Vx_2 + a_{24} \cdot Vy_2 \\ x_2 = a_{31} \cdot Vx_1 + a_{32} \cdot Vy_1 + a_{33} \cdot Vx_2 + a_{34} \cdot Vy_2 \\ y_2 = a_{41} \cdot Vx_1 + a_{42} \cdot Vy_1 + a_{43} \cdot Vx_2 + a_{44} \cdot Vy_2 \end{cases}, \quad (3)$$

где x_1, y_1, x_2 и y_2 – смещения пучка по осям x и y на датчиках 1 и 2 соответственно, a_{ij} – коэффициенты матрицы функций отклика управляющих элементов (актюаторов), Vx_1, Vy_1, Vx_2 и Vy_2 – напряжения на актюаторах корректоров наклонов 1 и 2.

Измерение функций отклика осуществляется поочередной подачей пробного напряжения на актюаторы зеркал. Например, подача напряжения Vx_1 на актюатор первого зеркала по оси x (при нулевых напряжениях на остальных актюаторах) позволяет определить коэффициенты a_{11}, a_{21}, a_{31} и a_{41} , подача напряжения Vy_1 – коэффициенты a_{12}, a_{22}, a_{32} и a_{42} и т.д. Пример измерения функций отклика приведен на рис. 5.

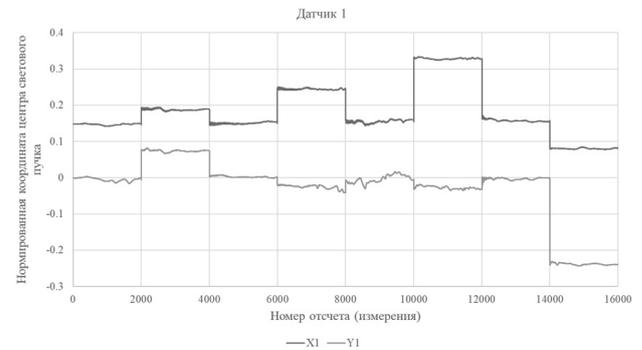


Рис. 5. Пример измерения функций отклика: координаты пучка на датчике 1

Ось абсцисс представляет номер отсчета (измерения), ось ординат – координаты, определенные по показаниям квадрантного датчика положения светового пучка № 1. Для повышения точности определения функций отклика используется усреднение измеренных значений при взятии N отсчетов. Так, в данном примере использовалось $N=2000$ для получения одного измеренного значения. График примера измерений функций отклика был получен без строгой юстировки датчиков и зеркал по линии вертикаль-горизонталь (рис. 6), т.е. и зеркала, и датчики были повернуты относительно оси распространения светового пучка на некоторый угол. Использование функций отклика в алгоритме вычисления управляющих напряжений позволяет полностью исключить ошибку, связанную с неидеальностью данной юстировки оптического тракта схемы.

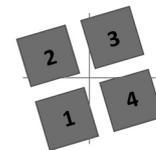


Рис. 6. Неидеальность юстировки – поворот датчика относительно оси пучка (линии вертикаль-горизонталь)

Для нахождения управляющих напряжений по заданным смещениям пучка используется матрица, обратная матрице функций отклика:

$$|I| = |A|^{-1} \cdot |ds|, \quad (4)$$

где $|I|$ – вектор напряжений, $|A|^{-1}$ – матрица, обратная матрице функций отклика $|A|$, $|ds|$ – вектор смещений координат светового пучка.

Для проведения экспериментов были созданы корректоры наклонов, фотография представлена на рис. 7.

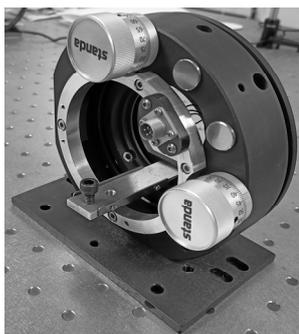


Рис. 7. Фотография корректора наклонов волнового фронта в карданной оправе

Основные характеристики корректоров наклонов сведены в табл. 1.

Табл. 1. Основные параметры корректора наклонов

Параметр	Значение
Диаметр зеркала	50 мм
Покрывие	Серебро с защитным слоем
Тип оправы	Карданная
Угол наклона	± 1000 мкрад
Первый резонанс	1500 Гц
Емкость актюаторов	1 мкФ
Число актюаторов	4

Для исследования работы стабилизатора положения пучка была собрана установка, соответствующая рис. 2. Турбулентность воздушного потока создавалась при помощи тепловентилятора, воздушный поток которого был направлен горизонтально. При проведении экспериментов была взята выборка координат положения светового пучка с датчиков длительностью около 8 секунд, при этом было записано 4096 отсчетов (2^{12} , для последующего анализа с помощью быстрого преобразования Фурье). Частота взятия выборок при этом составляла 542 Гц. Рис. 8 иллюстрирует фрагмент выборки длительностью 0,2 секунды. Плавность перехода графика от одного отсчета к другому показывает, что частота взятия выборок достаточна для отслеживания изменения положения пучка во времени.

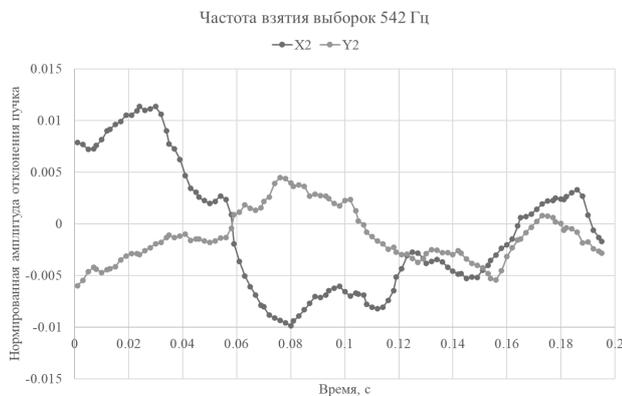


Рис. 8. Пример выборки по времени смещений пучка на датчике 2 по двум осям

На основе выборки по времени с помощью быстрого преобразования Фурье была получена выборка по частоте, соответствующая спектральной плотности мощности процесса (рис. 9). При этом разрешение в частотном диапазоне составляло порядка 0,13 Гц, а ширина рассматриваемого спектра, соответственно, порядка 270 Гц.

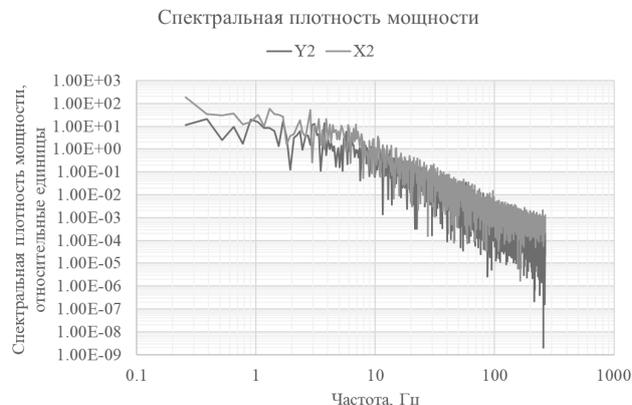


Рис. 9. Спектральная плотность мощности изменения координат пучка (на основе данных с датчика положения пучка 2)

Проводя интегрирование спектральной плотности мощности, можно получить график спектральной энергии, который представлен на рис. 10. Кривые на данном графике приходят в насыщение на частоте порядка 10 Гц, что позволяет определить ширину полосы частот искажений наклонов волнового фронта.

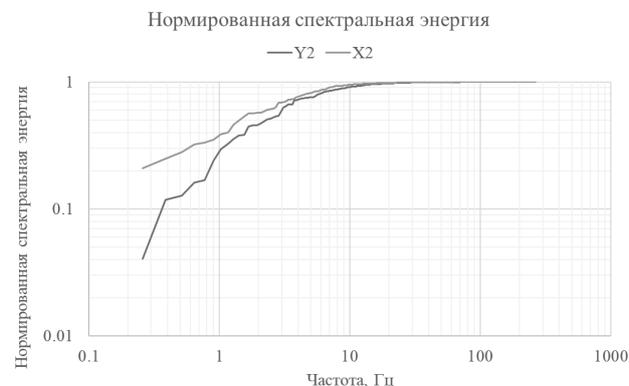


Рис. 10. Спектральная энергия изменения координат пучка (на основе данных с датчика положения пучка 2)

Таким образом, дискретная система стабилизации наклонов должна работать на частотах приблизительно в 10 раз выше, т.е. на частоте приблизительно 100 Гц. График (рис. 11) иллюстрирует работу системы стабилизации положения пучка на частоте 100 Гц. Видно, что данная частота достаточна для осуществления коррекции. На графике приведены смещенные координаты положения пучка, полученные по результатам измерений датчиков 1 и 2. В момент времени, соответствующий приблизительно 3,2 секунды, включается алгоритм коррекции, после чего смещения координат стремятся к нулю, что го-

ворит о достижении цели стабилизации положения светового пучка.

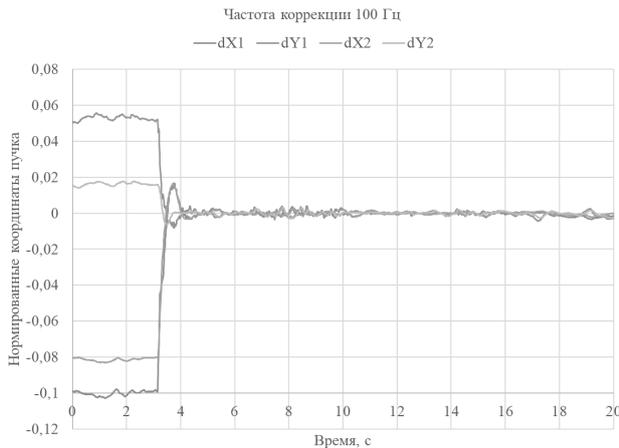


Рис. 11. Иллюстрация процесса стабилизации положения пучка

Применяя статистическую обработку к выборке, можно найти СКО (среднеквадратичное отклонение) остаточной ошибки коррекции. Для координаты x_1 СКО составляет $8,8 \cdot 10^{-4}$, для $y_1 - 1,2 \cdot 10^{-3}$, для $x^2 - 7,2 \cdot 10^{-4}$, для $y_2 - 9,0 \cdot 10^{-4}$

2. Коррекция aberrаций волнового фронта с помощью быстрой АОС

Как показано, например, в [38], частота aberrаций волнового фронта находится на уровне 100 Гц, следовательно, для эффективной коррекции таких aberrаций частота работы системы должна быть не менее 1000 Гц. Для достижения такой частоты работы была использована программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), в частности, программируемая пользователем вентильная матрица (ППВМ). Схема экспериментальной установки быстрой АОС представлена на рис. 12.

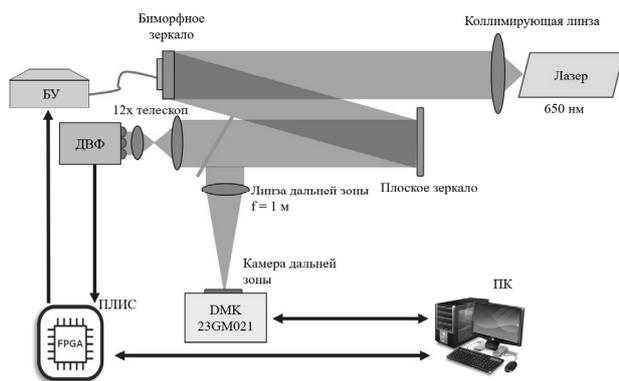


Рис. 12. Схема установки для исследования быстрой АОС (обозначения на рисунке: ПК – персональный компьютер, БУ – блок управления адаптивным зеркалом, ДВФ – датчик волнового фронта, ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема)

Излучение лазерного диода, сопряжённого с воллоном, при помощи линзы коллимируется в пучок диаметром 50 мм и попадает на биморфное зеркало –

корректор волнового фронта. После отражения от корректора через светоделитель часть излучения отводится на датчик волнового фронта Шака–Гартмана. Управление замкнутым циклом коррекции осуществляется с помощью ПЛИС. Для независимой оценки качества коррекции используется индикатор дальней зоны, образованный с помощью длиннофокусной линзы ($f = 1$ м) и камеры с мелким размером пикселя для получения более детального изображения распределения интенсивности в дальней зоне. Основные результаты исследования АОС представлены в работе [43]. Быстрая АОС на основе биморфного корректора не способна корректировать наклоны волнового фронта, поэтому был проведен ряд экспериментов по исследованию совместной работы системы стабилизации положения пучка в пространстве и быстрой АОС (рис. 13).

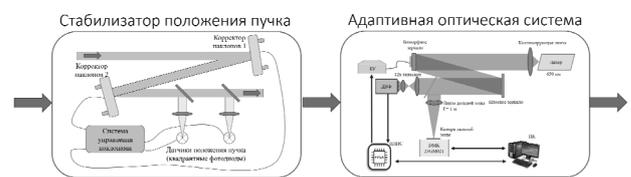


Рис. 13. Совместное использование стабилизатора положения пучка и быстрой АОС

В качестве корректора волнового фронта использовалось биморфное деформируемое зеркало диаметром 50 мм [44], структура электродов которого показана на рис. 14. Частота коррекции при проведении экспериментов достигала 2000 Гц (кадров в секунду).

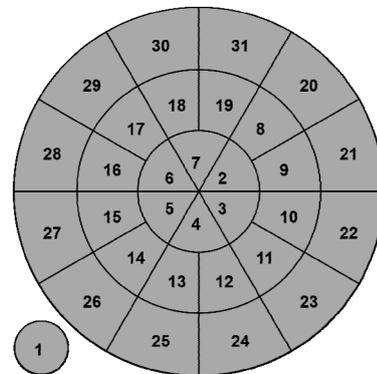


Рис. 14. Структура электродов корректора (1 – номер большого электрода, реализующего общий прогиб зеркала, 2 – 31 – номера внешних электродов, отвечающих за создание мелкомасштабных aberrаций)

Наиболее наглядным является представление волнового фронта светового излучения в виде ортогональных в единичной окружности полиномов Цернике [41, 42]. Поскольку волновой фронт под воздействием турбулентности претерпевает изменения во времени, удобно использовать интегральное представление разложения, выполненное путем расчета эквивалента энергии, приходящейся на тот или иной полином Цернике [45]. Исходное (без коррекции) распределение энергии турбулентности волнового фронта представлено на рис. 1. После проведения

коррекции волнового фронта (без коррекции наклонов) распределение энергии турбулентности по полиномам Цернике приобретает вид (рис. 15).

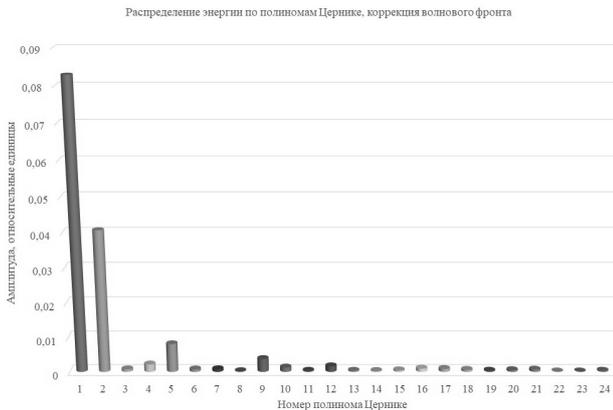


Рис. 15. Распределение энергии турбулентности по полиномам Цернике при коррекции волнового фронта (без коррекции наклонов)

Сравнивая рис. 1 и 15, можно увидеть уменьшение амплитуды основных aberrаций после проведения коррекции волнового фронта. Но в то же время следует отметить, что АОС, использующая в качестве корректора биморфное деформируемое зеркало, не способна корректировать наклоны, поэтому интенсивность наклонов увеличивается по сравнению с исходными значениями.

Более удобной формой представления эффективности коррекции служит отношение исходной амплитуды заданной aberrации (полинома Цернике) к амплитуде, полученной после коррекции, выраженное в децибелах. Соответствующая диаграмма представлена на рис. 16.

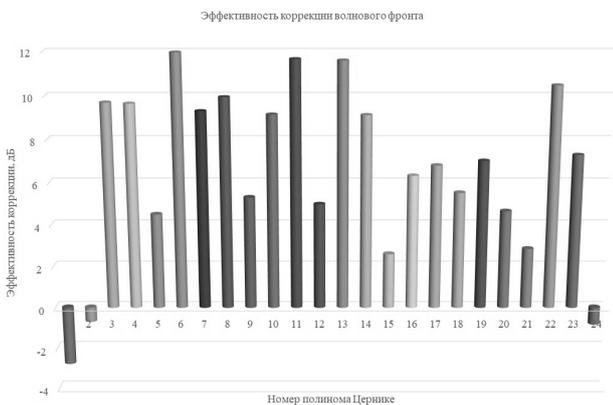


Рис. 16. Эффективность коррекции волнового фронта (без коррекции наклонов)

Положительные значения на диаграмме отражают уменьшения амплитуды заданного полинома, а отрицательные – её увеличение. По причине отсутствия коррекции наклонов отношение исходной амплитуды энергии наклонов к амплитуде после коррекции меньше единицы, и после перевода в децибелы данная величина становится отрицательной. Также отсутствует коррекция полинома № 24, соответствующего сферической aberrации 4-го порядка, что обусловлено ограниченной пространственной разрешающей способностью корректора волнового фронта.

Дальнейшие эксперименты были проведены при совместном использовании корректора наклонов и АОС. В результате после коррекции распределение энергии по полиномам Цернике выглядит следующим образом (рис. 17).

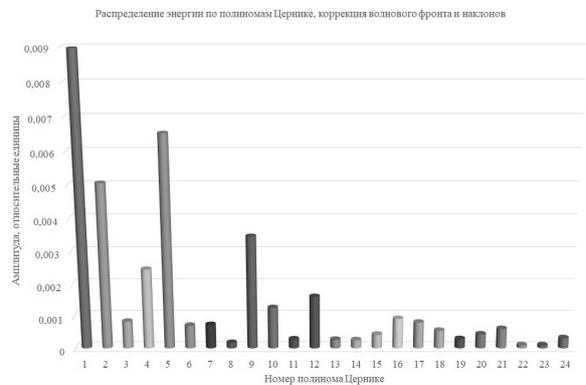


Рис. 17. Распределение энергии турбулентности по полиномам Цернике при одновременной коррекции волнового фронта и наклонов

Эффективность коррекции представлена на рис. 18.

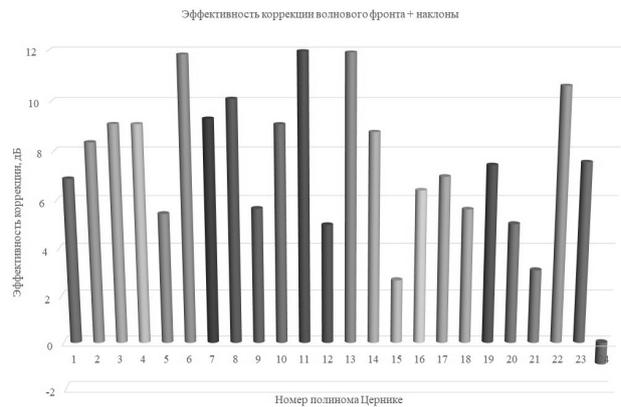


Рис. 18. Эффективность коррекции волнового фронта при одновременной стабилизации положения пучка

Сравнивая рис. 16 и 18, можно сделать вывод, что использование стабилизатора положения пучка позволяет существенно уменьшить амплитуду наклонов. В то же самое время коррекция остальных aberrаций волнового фронта остается практически неизменной.

Заключение

Проведено исследование разработанной адаптивной оптической системы коррекции волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося в условиях сильной атмосферной турбулентности. Показана эффективность стабилизации положения лазерного пучка в пространстве с помощью двух зеркал, контур управления которыми включает в себя два квадрантных датчика и ПЛИС. Показана возможность компенсации aberrаций волнового фронта

вплоть до 23-го полинома Цернике с помощью адаптивного зеркала, управляемого с помощью другой ПЛИС на основе информации с датчика Шака–Гартмана. В лабораторных испытаниях был задействован тепловентилятор в качестве источника атмосферной турбулентности. Ширина полосы возмущающего воздействия искусственной турбулентности в экспериментах не превышала 100 Гц. Это соответствовало среднестатистическому состоянию реальной атмосферы. В работе приведены результаты компенсации волнового фронта на частотах до 2000 Гц. Показано, что 10-кратное увеличение частоты коррекции волнового фронта по отношению к ширине полосы частот возмущающего воздействия обеспечивает устойчивую коррекцию, и распределение интенсивности излучения в дальней зоне при этом приближается к дифракционному.

Благодарности

Работы по стабилизации лазерного пучка (часть 1) выполнены при поддержке РФФИ в рамках гранта № 20-19-00597, эксперименты по исследованию искусственной турбулентности (часть 2) выполнены при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900183-1), эксперименты по созданию адаптивных зеркал выполнены в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023-2025»).

References

- [1] Lu M, Bagheri M, James AP, Phung T. Wireless charging techniques for UAVs: a review, reconceptualization, and extension. *IEEE Access* 2018; 6: 29865-29884. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2841376.
- [2] Wang C, Ma Z. Design of wireless power transfer device for UAV. 2016 *IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation* 2016: 2449-2454. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558950.
- [3] Chittoor PK, Chokkalingam B, Mihet-Popa L. A review on UAV wireless charging: Fundamentals, applications, charging techniques and standards. *IEEE Access* 2021; 9: 69235-69266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077041.
- [4] Landis GA, Westerlund H. Laser beamed power – Satellite demonstration applications. *NASA Contractor Report* 190793 1992: IAF-92-0600.
- [5] Huang Q, Liu D, Chen Y, Wang Y, Tan J, Chen W, Liu J, Zhu N. Secure free-space optical communication system based on data fragmentation multipath transmission technology. *Opt Express* 2018; 26(10): 13536-13542. DOI: 10.1364/OE.26.013536.
- [6] Nafria V, Han X, Djordjevic I. Improving free-space optical communication with adaptive optics for higher order modulation. *Proc SPIE* 2020; 11509: 115090K. DOI: 10.1117/12.2568713.
- [7] Vorontsov M, Weyrauch T, Carhart G, Beresnev L. Adaptive optics for free space laser communications. In *Book: Lasers, sources and related photonic devices, OSA technical digest series (CD)*. Optica Publishing Group; 2010: LSMA1. DOI: 10.1364/LSC.2010.LSMA1
- [8] Weyrauch T, Vorontsov M. Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments. *J Optic Comm Rep* 2004; 1: 355-379. DOI: 10.1007/s10297-005-0033-5.
- [9] Lema GG. Free space optics communication system design using iterative optimization. *J Opt Commun* 2020; 44(s1): s1205-s1216. DOI: 10.1515/joc-2020-0007.
- [10] Zhang Y, Wang Y, Deng Y, Du A, Liu J. Design of a free space optical communication system for an unmanned aerial vehicle command and control link. *Photonics* 2021; 8(5):163. DOI: 10.3390/photonics8050163.
- [11] Majumdar A. Fundamentals of free-space optical (FSO) communication system. In *Book: Majumdar A. Advanced free space optics (FSO)*. New York, NY: Springer; 2015: 1-20. DOI: 10.1007/978-1-4939-0918-6_1.
- [12] Nikitin A, Galaktionov I, Sheldakova J, Kudryashov A, Samarkin V, Rukosuev A. Focusing laser beam through pinhole using bimorph deformable mirror. *Proc SPIE* 2019; 10904: 109041I. DOI: 10.1117/12.2510134.
- [13] Wang R, et al. Demonstration of horizontal free-space laser communication with the effect of the bandwidth of adaptive optics system. *Opt Commun* 2019; 431: 167-173. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.09.038.
- [14] Rukosuev A, Belousov V, Galaktionov I, Kudryashov A, Nikitin A, Samarkin V, Sheldakova J. 1.5 kHz adaptive optical system for free-space communication tasks. *Proc SPIE* 2020; 11272: 112721G. DOI: 10.1117/12.2548337.
- [15] Bennet Fr, Conan R, D'Orgeville C, Dawson M, Paulin N, Price I, Rigaut F, Ritchie I, Smith C, Uhlendorf K. Adaptive optics for laser space debris removal. *Proc SPIE* 2012; 8447: 844744. DOI: 10.1117/12.925773.
- [16] Phipps C, et al. Removing orbital debris with lasers. *Adv Space Res* 2012; 49(9): 1283-1300. DOI: 10.1016/j.asr.2012.02.003.
- [17] Shen S, Jin X, Hao C. Cleaning space debris with a space-based laser system. *Chin J Aeronaut* 2014; 27(4): 805-811. DOI: 10.1016/j.cja.2014.05.002.
- [18] Barros R, Keary S. Experimental setup for investigation of laser beam propagation along horizontal urban path. *Proc SPIE* 2014; 9242: 92421L. DOI: 10.1117/12.2070694.
- [19] Mata-Calvo R. Transmitter diversity verification on Artemis geostationary satellite. *Proc SPIE* 2014; 8971: 897104. DOI: 10.1117/12.2036554.
- [20] Mosavi N, Marks B, Boone B, Menyuk C. Optical beam spreading in the presence of both atmospheric turbulence and quartic aberration. *Proc SPIE* 2014; 8971: 897103. DOI: 10.1117/12.2033561.
- [21] Murty SSR. Laser beam propagation in atmospheric turbulence. *Proc Indian Acad Sci* 1979; 2: 179-195. DOI: 10.1007/BF02845031.
- [22] Kwiecień J. The effects of atmospheric turbulence on laser beam propagation in a closed space—An analytic and experimental approach. *Opt Commun* 2019; 433: 200-208. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.09.022.
- [23] Searles S, Hart G, Dowling J, Hanley S. Laser beam propagation in turbulent conditions. *Appl Opt* 1991; 30: 401-406. DOI: 10.1364/AO.30.000401.
- [24] Gareth D, Naven C. Experimental analysis of a laser beam propagating in angular turbulence. *Open Physics* 2022; 20(1): 402-415. DOI: 10.1515/phys-2022-0038.
- [25] Summerer L, Purcell O. Concepts for wireless energy transmission via laser. *J Br Interplanet Soc* 2005; 58.
- [26] Fahey T, Islam M, Gardi A, Sabatini R. Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications. *Atmosphere* 2021; 12(7): 918. DOI: 10.3390/atmos12070918.
- [27] Zohuri B. Atmospheric propagation of high-energy laser beams. In: *Zohuri B. Directed energy weapons*. Cham: Springer; 2016: 379-414. DOI: 10.1007/978-3-319-31289-7_8.

- [28] Shuto Y. Effect of water and aerosols absorption on laser beam propagation in moist atmosphere at eye-safe wavelength of 1.57 μm . *J Electr Electron Eng* 2023; 11(1): 15-22. DOI: 10.11648/j.jee.20231101.12.
- [29] Rosen L, Ipser J. High energy laser beam scattering by atmospheric aerosol aureoles. *Proc SPIE* 1989; 1060. DOI: 10.1117/12.951743.
- [30] Oosterwijk A, Heikamp S, Manders-Groot A, Lex A, Eijk J. Comparison of modelled atmospheric aerosol content and its influence on high-energy laser propagation. *Proc SPIE* 2019; 11133: 111330C. DOI: 10.1117/12.2529949.
- [31] Directed energy weapons are real . . . and disruptive. *PRISM* 2020; 8(3): 37-46.
- [32] Buck AL. Effects of the atmosphere on laser beam propagation. *Appl Opt* 1967; 6: 703-708.
- [33] Galaktionov I, Kudryashov A, Sheldakova J, Nikitin A, Samarkin V. Laser beam focusing through the atmosphere aerosol. *Proc SPIE* 2017; 10410: 104100M. DOI: 10.1117/12.2276180.
- [34] Singh S, Mishra SK, Mishra AK, Ring Pearcey vortex beam dynamics through atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am B* 2023; 40: 2287-2295. DOI: 10.1364/JOSAB.494677.
- [35] Thobois L, Cariou J.P., Gultepe I. Review of lidar-based applications for aviation weather. *Pure Appl. Geophys.* 2019; 176(4/5), 1959–1976. DOI: 10.1007/s00024-018-2058-8.
- [36] Lylova A, Kudryashov A, Sheldakova J, Borsoni G. The real-time atmospheric turbulence modeling and compensation with the use of adaptive optics. *Proc SPIE* 2015; 9641: 96410K. DOI: 10.1117/12.2194980.
- [37] Tatarski VI. Wave propagation in a turbulent medium. Dover Publications; 2016. ISBN: 0486810291.
- [38] Andrews LC, Phillips RL. Laser beam propagation through random media. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press; 2005. DOI: 10.1117/3.626196.
- [39] Rukosuev AL, Kudryashov AV, Lylova AN, Samarkin VV, Sheldakova YuV. Adaptive optical system for real-time wavefront correction. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2015; 28(4): 381-386.
- [40] Rukosuev A, Nikitin A, Belousov V, Sheldakova J, Toporovsky V, Kudryashov A. Expansion of the laser beam wavefront in terms of Zernike polynomials in the problem of turbulence testing. *Appl Sci* 2021; 11(24): 12112. DOI: 10.3390/app112412112.
- [41] Wyant JC, Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology. *Proc of Applied Optics and Optical Engineering* 1992: 27-39.
- [42] Niu K, Tian C. Zernike polynomials and their applications. *J Opt* 2022; 24(12): 123001.
- [43] 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; 28(25): 37546-37552. DOI: 10.1364/OE.409201.
- [44] Toporovskii V, Skvortsov A, Kudryashov A, Samarkin V, Sheldakova Yu, Pshonkin D. Flexible bimorphic mirror with high density of control electrodes for correcting wavefront aberrations. *J Opt Technol* 2019; 86: 32-38.
- [45] Dai G.M, Mahajan V.N. Orthonormal polynomials in wavefront analysis: error analysis. *Appl. Opt.* 47, 3433-3445 2008(8). DOI: 10.1364/AO.47.003433.

Сведения об авторах

Рукоусев Алексей Львович, 1962 года рождения, в 1985 году окончил Московский авиационный институт по специальности 0501 «Радиотехника», работает старшим научным сотрудником в ИДГ РАН, кандидат физико-математических наук. Область научных интересов: адаптивная оптика, атмосферная оптика, радиоэлектроника, компьютерная оптика, сверхмощные лазерные системы. E-mail: alru@nightn.ru

Никитин Александр Николаевич, 1961 года рождения, учился в Московском инженерно-физическом институте. Работает научным сотрудником в лаборатории «Атмосферной адаптивной оптики» в Институте динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН. Область научных интересов: компьютерная оптика, адаптивная оптика, мощные лазеры. E-mail: nikitin@activeoptics.ru

Галактионов Илья Владимирович, 1990 года рождения, выпускник Владимирского государственного университета (2012 г., факультет прикладной математики и физики), кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН. Специалист в области управления рассеянным лазерным излучением с помощью адаптивной оптики. Область научных интересов: рассеяние излучения, распространение излучения сквозь рассеивающие среды, формирование лазерного излучения, датчики волнового фронта, адаптивная оптика. E-mail: galaktionov@activeoptics.ru

Шелдакова Юлия Вячеславовна, 1978 года рождения, училась во Владимирском государственном университете. В 2000 году окончила курсы повышения квалификации по специальности «Лазерная физика» в МЛЦ МГУ. В 2007 году защитила кандидатскую диссертацию в МГУ «Диагностика лазерных пучков и управление их пространственными характеристиками методами адаптивной оптики». Кандидат физико-математических наук. Место работы: Институт динамики геосфер РАН, лаборатория атмосферной адаптивной оптики, старший научный сотрудник. Область научных интересов: адаптивная оптика, атмосферная оптика, сверхмощные лазерные системы, лазерные резонаторы, интерферометрия, транспортировка лазерного излучения сквозь турбулентную и рассеивающую среду. E-mail: sheldakova@nightn.ru

Кудряшов Алексей Валерьевич, 1960 года рождения, учился в Московском государственном университете на физическом факультете. Работает заведующим лабораторией «Атмосферной адаптивной оптики» в Институте динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН. Доктор физико-математических наук, профессор. Область научных интересов: компьютерная оптика, адаптивная оптика, мощные лазеры. E-mail: kud@activeoptics.ru

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 20 мая 2023 г. Окончательный вариант – 31 декабря 2023 г.

Real-time adaptive optics for high-power laser beam correction in the strong turbulence.

A.L. Rukosuev¹, A.N. Nikitin¹, I.V. Galaktionov¹, Y.V. Sheldakova¹, A.V. Kudryashov^{1,2}

¹*M.A.Sadovskii Institute of Geosphere Dynamics RAS, 119334, Russia, Moscow, Leninsii prospect 38, bld.1;*

²*Moscow Polytechnical University, 107334, Russia, Moscow, Bolshaya Semenovskaya str. 38*

Abstract

A combined adaptive optical system designed to correct the wavefront of light radiation distorted by the influence of strong atmospheric turbulence is presented. The system consists of a beam position stabilizer and a fast adaptive optical system operating in real time. Stabilization of the beam position is carried out by two electronically controlled tilt mirrors. The control loop includes two quadrant sensors and an FPGA (field-programmable gate array) that closes the feedback loop. Using information received from Shack-Hartmann wavefront sensor, a bimorph-based adaptive mirror, controlled by another FPGA, is able to compensate for wavefront aberrations for up to 23-th Zernike polynomial in real time. The system was tested under the laboratory turbulence conditions created by a fan heater. The bandwidth of the artificial turbulence in the experiments did not exceed 100 Hz, which corresponds to the average statistical state of the real atmosphere. Results of the correction of the wave front distorted by the artificial turbulence are presented. It is shown that when only a bimorph corrector is used, the value of wavefront tilt angles increases. This presents a certain problem, since a significant part of the turbulence energy falls on the wave front tilts. To address this problem, it is proposed additionally using a system for stabilizing the position of the light beam.

Keywords: adaptive optical system, atmospheric turbulence, wavefront corrector, Zernike polynomials, computer optics.

Citation: Rukosuev AL, Nikitin AN, Galaktionov IV, Sheldakova JV, Kudryashov AV. Real-time adaptive optics for high-power laser beam correction in the strong turbulence. *Computer Optics* 2024; 48(4): 511-518. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1352.

Acknowledgements: Work on the stabilization of the laser beam (Chapter 1) was funded by the Russian Science Foundation under grant No. 20-19-00597, experiments on the study of artificial turbulence (Chapter 2) were funded from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 122032900183-1), experiments with adaptive mirrors were funded under the program of the National Center for Physics and Mathematics, Project "Physics of high energy density". Stage 2023-2025».

Authors' information

Alexey Lvovich Rukosuev (b. 1962) graduated from Moscow Aviation Institute in 1985 with a degree in 0501 "Radio Engineering", works as a senior researcher at the M.A. Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics RAS, PhD. Research interests: adaptive optics, atmospheric optics, radioelectronics, computer optics, heavy-duty laser systems. E-mail: alru@nighn.ru

Alexander Nikolaevich Nikitin (b. 1961) studied at Moscow Engineering Physics Institute. He works as a Researcher in the Laboratory of "Atmospheric Adaptive Optics" at the M.A. Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics RAS. Research interests: computer optics, adaptive optics, high-power lasers. E-mail: nikitin@activeoptics.ru

Ilya Vladimirovich Galaktionov (b. 1990) graduate of Vladimir State University (2012, Faculty of Applied Mathematics and Physics), PhD, researcher at the M.A. Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics RAS. Specialist in the field of control of scattered laser radiation using adaptive optics. Research interests: radiation scattering, radiation propagation through scattering media, laser radiation formation, wavefront sensors, adaptive optics. E-mail: galaktionov@activeoptics.ru

Yulia Vyacheslavovna Sheldakova (b. 1978) studied at Vladimir State University. In 2000, she completed advanced training courses in the specialty "Laser Physics" at the MLC of Moscow State University. In 2007, she defended her PhD thesis at Moscow State University "Diagnostics of laser beams and control of their spatial characteristics by adaptive optics methods". PhD. Place of work: M.A. Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics RAS, Laboratory of Atmospheric Adaptive Optics, Senior Researcher. Research interests: adaptive optics, atmospheric

optics, heavy-duty laser systems, laser resonators, interferometry, transportation of laser radiation through turbulent and scattering media. E-mail: sheldakova@nightn.ru

Alexey Valeryevich Kudryashov (b. 1960) studied at Moscow State University at Physics faculty. He works as the Head of the Laboratory of "Atmospheric Adaptive Optics" at the M.A. Sadoysky Institute of Geosphere Dynamics RAS. Professor. Research interests: computer optics, adaptive optics, high-power lasers. E-mail: kud@activeoptics.ru

Received May 20, 2023. The final version – December 31, 2023.
