

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 535.31.593

Адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта в реальном времени

А.Л. Рукоуев, А.В. Кудряшов, А.Н. Лылова,
В.В. Самаркин, Ю.В. Шелдакова*

Московский государственный машиностроительный университет
107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38

Поступила в редакцию 6.11.2014 г.

Рассматривается быстрая адаптивная система для компенсации атмосферной турбулентности, частота ее работы достигает 200 Гц. Для построения системы было использовано деформируемое зеркало с 97 пьезоприводами и датчик Шака–Гартмана, быстродействие которого около 2 кГц. Также приводится зависимость остаточной ошибки коррекции синусоидального сигнала от скорости реакции системы.

Ключевые слова: адаптивная оптика, деформируемое зеркало, атмосферная турбулентность, датчик волнового фронта Шака–Гартмана; adaptive optics, deformable mirror, atmospheric turbulence, Shack–Hartmann wavefront sensor.

В настоящее время ведется множество исследований в области передачи данных сквозь атмосферу Земли с помощью оптического сигнала [1]. В качестве примера можно привести беспроводную передачу на большие расстояния либо энергии, либо информации, что используется как на вертикальных, так и на горизонтальных трассах распространения световых лучей. К преимуществам оптических систем относят возможность расширения диапазона частот, доступных для передачи сигнала, защищенность от перехвата информации.

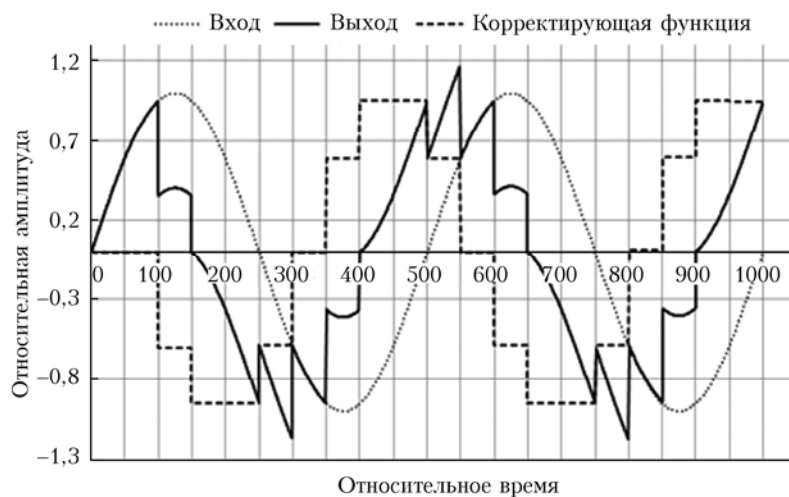
Однако следует помнить, что при распространении излучения в атмосфере на большие расстояния существенную роль начинает играть явление атмосферной турбулентности, способствующее искажениям волнового фронта, что наряду с дифракцией света приводит к потере качества и уменьшению плотности мощности сигнала [2]. Следовательно, возникает необходимость в повышении надежности работы оптических систем при различных погодных условиях. Одним из наиболее перспективных способов решения данной проблемы является использование методов и элементов адаптивной оптики, в частности корректоров волнового фронта излучения, которые с помощью изменения своего профиля в реальном времени способны компенсировать искажения сигнала, вызванные турбулентными флуктуациями в атмосфере Земли [3].

Определенный интерес представляет рассмотрение самого процесса динамической коррекции аберраций. Замкнутая адаптивная оптическая система (АОС) является дискретной по времени, так как информация о волновом фронте поступает с видеокамеры в виде отдельных кадров с определенной тактовой частотой. Следовательно, если в алгоритме коррекции не используются те или иные методы экстраполяции, то управляющий сигнал также будет дискретным по времени, причем частота изменения этого сигнала не превышает значение частоты кадров видеокамеры датчика волнового фронта.

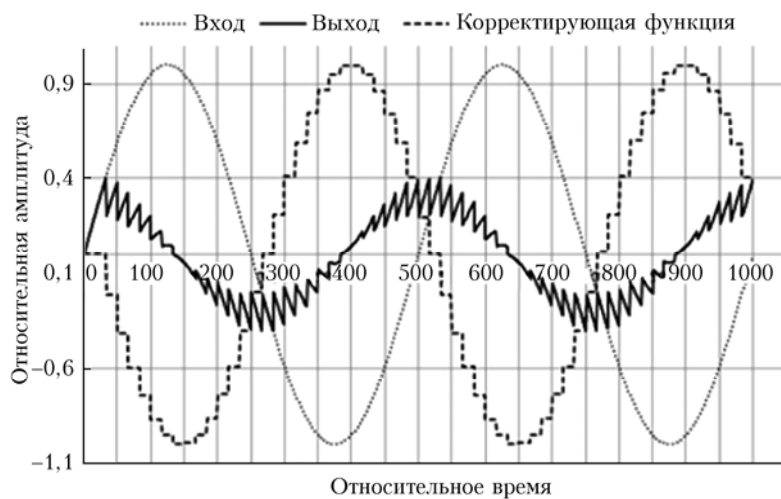
Поскольку любой реальный сигнал есть непрерывная функция, работа системы с использованием дискретной по времени выборки неизбежно приводит к ошибке, вызванной тем, что в промежутке между подачей управляющих сигналов исполнительный элемент (корректор волнового фронта) не изменяет своего состояния, в то время как входной сигнал меняется. В реальной системе ошибка коррекции будет даже несколько больше за счет того, что управляющее воздействие подается на адаптивное зеркало не в момент измерения волнового фронта, а с некоторой задержкой, обусловленной процессом обработки входной информации [4].

Удобно рассмотреть процесс дискретной коррекции на примере входного сигнала в виде синусоиды. Данный процесс при использовании пропорционального алгоритма показан на рис. 1. Предполагается, что после измерения значения входного сигнала идеальная адаптивная система выставляет корректирующий сигнал, равный по величине входному, но с обратным знаком. При этом при выставлении управляющего воздействия учитывается лишь временная задержка, равная периоду следования отсчетов (частоте кадров видеокамеры).

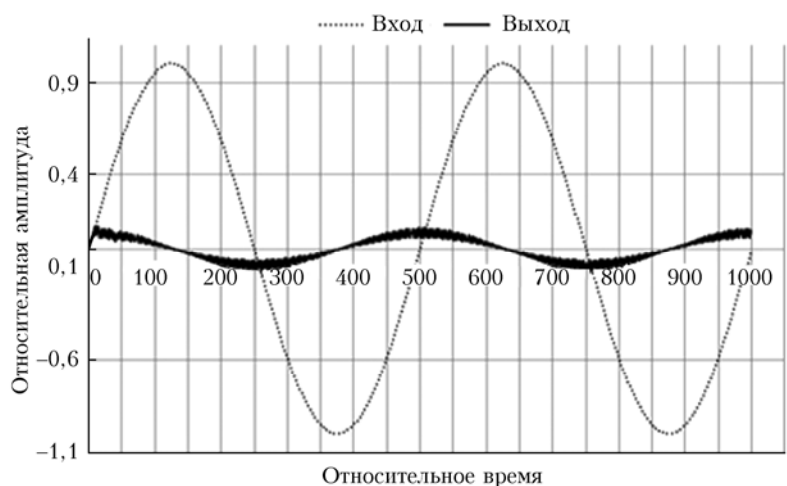
Алексей Львович Рукоуев (alru@nightn.ru); Алексей Валерьевич Кудряшов (kud@activeoptics.ru); Анна Николаевна Лылова (ann_lylova@activeoptics.ru); Вадим Васильевич Самаркин (samarkin@activeoptics.ru); Юлия Вячеславовна Шелдакова (sheldakova@nightn.ru).



a



b



в

Рис. 1. Результат коррекции: *a* – при 10, *b* – 30, *в* – 100 отсчетах на период

Иные временные задержки или ошибки коррекции нами не брались во внимание. Видно, что при использовании 10 отсчетов на период синусоиды (см. рис. 1, а) коррекция отсутствует, однако при 30 отсчетах на период (см. рис. 1, б) возможно уменьшение амплитуды входного сигнала примерно в 2 раза. Удастся получить более или менее приемлемые результаты, если на период синусоиды приходится порядка 100 дискретных отсчетов коррекции (см. рис. 1, в). В этом случае остаточная ошибка коррекции составляет 0,1 от амплитуды входного сигнала.

Состав типичной замкнутой АОС, позволяющей воздействовать на волновой фронт, представлен на рис. 2.

Входящий лазерный луч падает на ключевой элемент АОС – деформируемое зеркало (ДЗ) – и далее отражается в направлении приемника (мишени). Часть лазерного пучка, отразившегося от ДЗ, ответвляется на датчик волнового фронта (ДВФ) с помощью полупрозрачной светоделительной пластины. Информация с ДВФ поступает в компьютер, который по определенному алгоритму рассчитывает управляющие напряжения, которые необходимо подать на ДЗ для коррекции волнового фронта падающего излучения. Блок управления деформируемым зеркалом усиливает вычисленные напряжения до величины, необходимой для нормальной работы ДЗ.

Выбор элементов системы во многом обуславливается теми задачами, для решения которых система предназначена. Так, в случае распространения

излучения вдоль наклонной трассы длиной 2–3 км под углом 45° характерные частоты флуктуации фазы атмосферной турбулентностью на апертуре D 400 мм составляют порядка 70 Гц [5]. Более того, атмосферная турбулентность, как правило, способствует мелкомасштабным искажениям волнового фронта, которые в данном случае составляют характерный размер ~ 40 мм при длине волны $\lambda \sim 500$ нм. Таким образом, отношение диаметра апертуры к радиусу когерентности равняется 10 и, следовательно, для эффективной компенсации подобных искажений из всего спектра гибких зеркал целесообразно выбрать ДЗ на толкателях. К его достоинствам можно отнести:

1) быстрый отклик на поданное управляющее напряжение;

2) локальные функции отклика, что позволяет корректировать мелкомасштабные флуктуации волнового фронта;

3) достаточно широкий динамический диапазон изменения изгиба поверхности зеркала.

Другие типы управляемых зеркал не вполне подходят для задачи коррекции турбулентности атмосферы. Например, биморфные зеркала, обладая прекрасным быстродействием, имеют модальные функции отклика, что не позволяет с их помощью компенсировать мелкомасштабные флуктуации [6–8]. Зеркала на основе микроэлектромеханических систем в настоящее время дороги, ненадежны в работе и обладают недостаточным быстродействием [9].

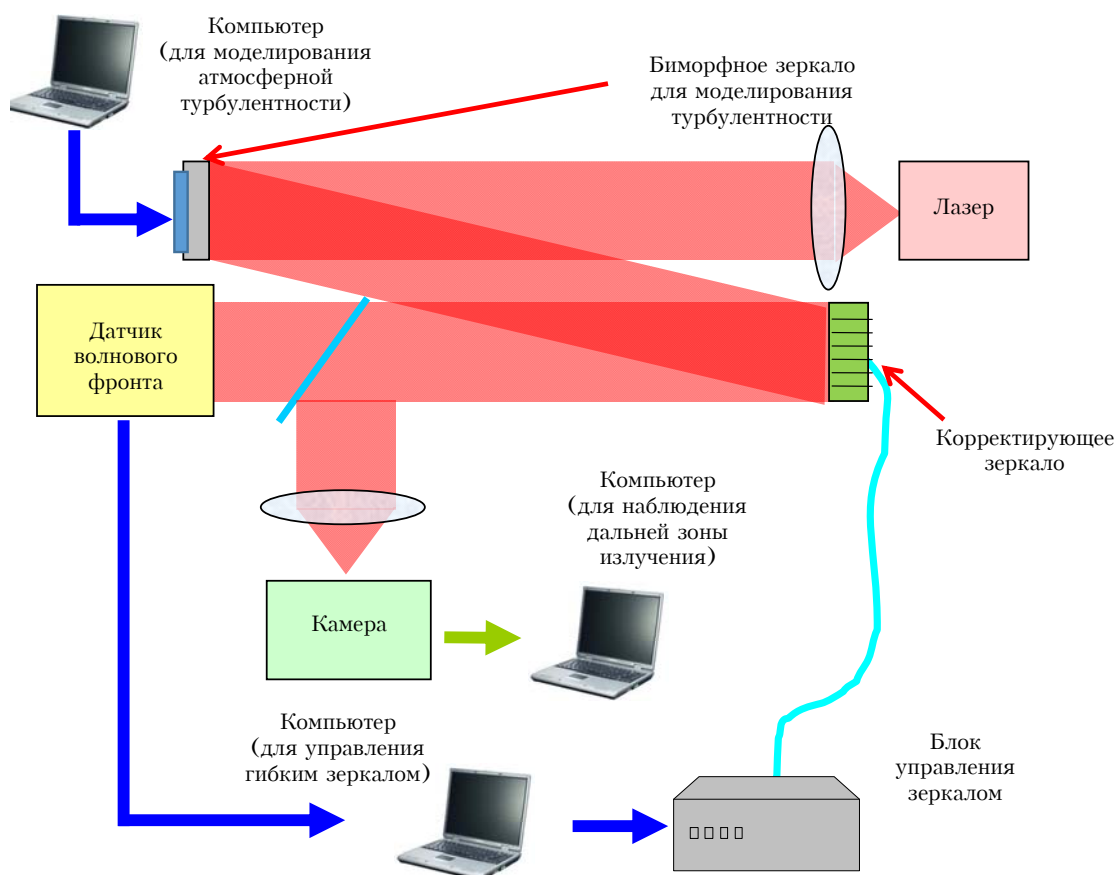


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Общий вид зеркала и интерферограммы функций отклика отдельных пьезоприводов представлены на рис. 3.

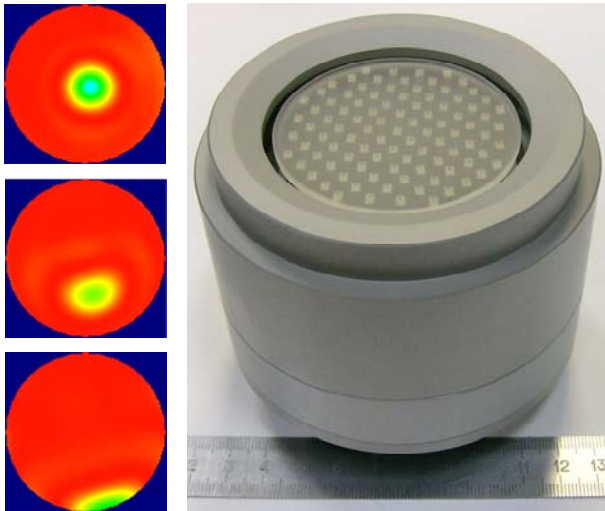


Рис. 3. Общий вид зеркала на толкателях и функции отклика отдельных приводов

Основные параметры созданного корректора приведены ниже.

Активная апертура	50 мм
Размер пьезоприводов	2 × 3 × 12 мм
Диапазон рабочих напряжений	−100 – +300 В
Зазор между пьезоприводами	4,5–5,0 мм
Конфигурация расположения пьезоприводов	квадратная, 11 × 11
Число пьезоприводов	97
Максимальный прогиб	± 3,5 мкм
Частота первого резонанса пьезоприводов	15 кГц
Оптическое покрытие	Ag
Масса	920 г

В качестве датчика волнового фронта для решения поставленной задачи целесообразно использовать датчик типа Шака–Гартмана [10–12]. К его достоинствам можно отнести:

- 1) возможность быстрого анализа волнового фронта;
- 2) слабую чувствительность к изменениям интенсивности излучения, вибрациям;
- 3) простоту использования;
- 4) относительно невысокую цену.

В соответствии с принципом работы датчика падающий волновой фронт разбивается на отдельные участки, в пределах которых локальный наклон считается постоянным. В зависимости от наклона фазового фронта происходит смещение фокальных пятен, формирующихся микролинзами раstra. Эти смещения пропорциональны локальным наклонам волнового фронта, и, следовательно, посредством измерения их величины представляется возможным восстановить структуру всего волнового фронта излучения.

В частности, восстановить волновой фронт излучения можно с помощью модального метода разложения производной от фазы по полиномам Цернике [13]:

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial Z_p(x_k, y_k)}{\partial x}$$

и

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial Z_p(x_k, y_k)}{\partial y}, \quad (1)$$

где NP – число полиномов разложения; a_p – коэффициенты разложения при полиномах Цернике; $Z_p(x_k, y_k)$ – значения полинома Цернике p -го порядка в точках (x_k, y_k) . Поскольку локальные наклоны пропорциональны смещениям фокальных пятен ΔS , можно записать

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta x} = \frac{1}{f} S_x^k, \quad \frac{\Delta \varphi}{\Delta y} = \frac{1}{f} S_y^k \quad (2)$$

(f – фокус микролинзы). В матричной форме полученная система уравнений выглядит как $S = adZ$, где S – вектор смещений, отнесенных к фокусу f ; a – коэффициенты при полиномах Цернике; dZ – прямоугольная матрица производных от двухмерных полиномов Цернике размером $NP \cdot 2NK$ (NK – число пятен на гартманограмме).

Выбор камеры для датчика волнового фронта определяется прежде всего требованиями по быстродействию. Мы использовали камеру, основанную на технологии КМОП от фирмы Photon Focus MV-D752-160-CL-8. Обладая хорошим быстродействием, доходящим до 2 кГц при размере изображения 256 × 256 пикселей, данная камера может быть использована в быстрой адаптивной системе. Изображение из камеры в компьютер передается посредством цифрового интерфейса Camera Link, что требует наличия в компьютере соответствующей платы расширения. В качестве таковой может выступать, например, фотоввод стандарта Camera Link microEnable III.

Еще одним элементом, определяющим параметры датчика Шака–Гартмана, является микролинзовый растр. Размер микролинз и их фокусное расстояние должны быть согласованы как с размером сенсора камеры, так и с шагом управляющих приводов, их числом и aberrациями, которые предполагается измерять. Учет всех данных требований предполагал использование микролинзового раstra с прямоугольным расположением линз размером 160 × 160 мкм и фокусным расстоянием 6 мм.

Основные параметры датчика Шака–Гартмана приведены ниже.

Рабочий диапазон длин волн	350–1100 нм
Пространственное разрешение	до 160 мкм
Точность измерений	длина волны / 100
Частота сбора и анализа данных	до 1000 Гц
Компьютерный интерфейс	Camera Link
Фокусное расстояние линзового раstra	6 мм
Число рабочих субапертур	16 × 16
Размер входного пучка	2,5 × 2,5 мм
Габаритные размеры датчика	62 × 54 × 68 мм
Масса	300 г

Существует несколько способов управления напряжениями на электродах деформируемого зеркала. Для реализации быстрой коррекции наилучшим образом подходит метод фазового сопряжения. Суть метода состоит в том, что поверхность деформируемого зеркала принимает такую форму, при которой волновой фронт отраженного от поверхности лазерного пучка соответствует требуемому. Чаще всего необходимо обеспечить плоский волновой фронт на выходе адаптивной системы.

Так как датчик волнового фронта Шака–Гартмана является разностным устройством, анализ входящего пучка осуществляется относительно некоторого начального положения фокальных пятен линзового раstra. Набор координат центров фокальных пятен, соответствующих начальному положению, называется опорным, или референсным. При коррекции волнового фронта по методу фазового сопряжения происходит расчет напряжений на ДЗ таким образом, чтобы координаты фокальных точек, полученных от корректируемого пучка, после подачи корректирующих напряжений максимально приближались к опорным координатам [14]. Вычислить напряжения можно, например, с помощью метода наименьших квадратов. Представим величины смещений фокальных точек линзового раstra в виде матрицы:

$$S_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N u_j b_j^i, \quad (3)$$

где N – количество электродов зеркала; u – напряжения на электродах зеркала; b – элементы функций отклика ДЗ. Функция отклика электрода зеркала представляет собой набор координат смещения фокальных пятен в ответ на воздействие напряжения единичной амплитуды на данный электрод:

$$b_{jx}^i = \Delta x_i / u_{0j}, \quad (4)$$

$$b_{jy}^i = \Delta y_i / u_{0j}. \quad (5)$$

Здесь Δx и Δy – смещения фокальных пятен по соответствующей оси; u_0 – напряжение, при котором происходит измерение функции отклика.

Для того чтобы найти набор напряжений на электродах зеркала по методу наименьших квадратов, необходимо обеспечить минимум функционала

$$\min \| \mathbf{S} - \mathbf{b} \cdot \mathbf{u} \|^2. \quad (6)$$

Решение находится в виде

$$\mathbf{u} = \| \mathbf{B} \|^{\cdot} \cdot \mathbf{S}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{B} = (\mathbf{b}^T \mathbf{b})^{-1} \mathbf{b}^T \quad (\mathbf{b}^T \text{ – транспонированная матрица } \mathbf{b}). \quad (8)$$

Процедура коррекции волнового фронта в реальной АОС выполняется в следующей последовательности.

1. Тестирование оборудования.
2. Загрузка опорного массива координат фокальных пятен (референс).
3. Измерение функций отклика.
4. Коррекция волнового фронта:
 - а) анализ волнового фронта;
 - б) вычисление управляющих напряжений;
 - в) подача управляющих напряжений на электроды зеркала.

Коррекция волнового фронта (п. 4) может выполняться многократно и в реальном масштабе времени. Для оценки быстродействия системы необходимо проанализировать временные интервалы всех составляющих п. 4.

Работа датчика волнового фронта характеризуется тремя временными отрезками: временем экспозиции камеры, передачей данных от камеры в компьютер и расчетом координат фокальных пятен. В используемом нами датчике волнового фронта время, необходимое на экспозицию и передачу данных, составляло приблизительно 0,5 мс, расчет координат фокальных пятен занимал около 3 мс. Для расчета напряжений требовалась 1 мс, время основных переходных процессов зеркала превышало 0,5 мс. Таким образом, один цикл коррекции в сумме длился около 5 мс, что позволяло говорить о достижении частоты коррекции 200 Гц. Однако, как правило, адаптивная система не позволяет производить полную коррекцию волнового фронта за один шаг (цикл). Это связано с такими факторами, как неточность измерения волнового фронта, наличие шумов, неправильность измерения функций отклика управляющих элементов и т.д. В нашем случае для достижения оптимальной коррекции требовалось 2–3 итерации, поэтому реальная частота работы замкнутой адаптивной системы составляла 65–70 Гц.

Исследования эффективности турбулентных флуктуаций фазы проводились на экспериментальной установке (см. рис. 2).

Пучок, излучаемый светодиодным лазером, с помощью выпуклой линзы преобразуется в параллельный и далее поступает на зеркало-генератор искусственной турбулентности. В качестве генератора турбулентности использовалось биморфное гибкое зеркало с 32 электродами [15], управляемое по специальному алгоритму, воспроизводящему фазовые экраны в реальном времени с колмогоровским спектром [16, 17].

Далее аберрированный пучок падал на корректирующее деформируемое зеркало на толкателях, после отражения от которого попадал на датчик волнового фронта и через светоделитель в независимую систему контроля интенсивности лазерного пучка в дальней зоне (см. рис. 3). Длиннофокусная линза и ПЗС-камера JAI имели следующие параметры: размер сенсора – 1/2", разрешение – 1392 × 1040, частота работы 30 Гц, размер пикселя 4,65 мкм, интерфейс – GigE.

Результаты измерений распределения интенсивности до коррекции и после представлены на рис. 4.

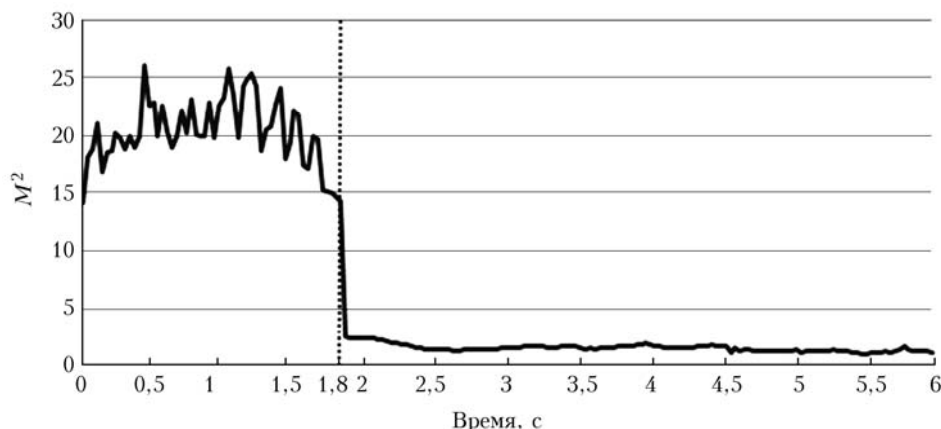


Рис. 4. Зависимость параметра M^2 лазерного пучка, прошедшего генератор турбулентности, от времени. В момент времени 1,8 с адаптивная система была включена

С начального момента времени до 1,8 с генератором турбулентности вводились крупномасштабные aberrации волнового фронта ($D/r_0 = 6$ (r_0 – радиус Фрида), частота Гринвуда $f_g = 60$), что приводило к флуктуациям интенсивности в фокусе линзы, соответствующим параметру M^2 , равному 25 ± 5 . При включении адаптивной системы значение M^2 существенно уменьшалось до 1,3–1,5. Таким образом, созданная АОС, работающая с частотой до 200 Гц, способна корректировать волновой фронт падающего излучения с частотой 65–70 Гц. Результаты коррекции подтверждены независимыми измерениями распределения интенсивности в дальней зоне.

Понятно, что данный эксперимент не может продемонстрировать возможности разработанной системы коррекции волнового фронта в полной мере. Однако полученные результаты позволяют надеяться на эффективное применение аналогичных устройств в реальных условиях компенсации aberrаций световых сигналов, прошедших сквозь атмосферные слои.

1. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 250 с.
2. Банах В.А., Смалыхо И.Н. Распространение лазерных пучков на вертикальных и наклонных трассах через турбулентную атмосферу // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 4. С. 377–384.
3. Kudryashov A.V., Shmalhausen V.I. Semipassive bimorph flexible mirror for atmospheric adaptive optics applications // Opt. Eng. 1996. V. 35, N 11. P. 3064–3073.
4. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Лавринова Л.Н. Динамическое адаптивное зеркало в алгоритме фазового сопряжения // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 12. С. 1879–1883.
5. Gupta A.K., Mishra S.K. Development of Adaptive Optics Imaging System at IRDE // Proc. XXXV OSI Symposium, International Conference on Contemporary Trends in Optics and Opto Electronics January 17–19, 2011. Thiruvananthapuram, India. 2011. P. 19–21.
6. Samarkin V., Aleksandrov A., Kudryashov A. Bimorph mirrors for powerful laser beam correction and forma-

tion // Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III / Ed. by J.D. Gonglewski, M.A. Vorontsov, M.T. Gruneisen. San Diego, CA, 2002. V. 4493. P. 269–276.

7. Rukosuev A., Alexandrov A., Zavalova V., Samarkin V., Kudryashov A. Adaptive optical system based on bimorph mirror and Shack–Hartmann wavefront sensor // Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III / Ed. by J.D. Gonglewski, M.A. Vorontsov, M.T. Gruneisen. San Diego, CA, 2002. V. 4493. P. 261–268.
8. Kudryashov A., Samarkin V., Aleksandrov A. Adaptive optical elements for laser beam control // Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering Spatial Light Modulators: Technology and Applications / Ed. by U. Efron. San Diego, CA, 2001. V. 4457. P. 170–178.
9. Bierden P., Bifano T., Cornelissen S. MEMS deformable mirrors for high performance AO applications // Adaptive Optics for Industry and Medicine: Proc. the Sixth Int. Workshop National University of Ireland, Ireland / Ed. By Christopher Dainty. 2007. P. 65–70.
10. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Фортес Б.В., Коняев П.А. Численная модель атмосферной адаптивной оптической системы. Часть 2. Датчики волнового фронта и исполнительные элементы // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 3. С. 419–427.
11. Александров А.Г., Завалова В.Е., Кудряшов А.В., Рукосуев А.Л., Шелдакова Ю.В., Самаркин В.В., Романов П.Н. Датчик волнового фронта Шака–Гартмана для измерения параметров мощных импульсных твердотельных лазеров // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 4. P. 321–326.
12. Akahane Y., Ma J., Fukuda Y., Aoyama M., Kiriya H., Yamakawa K., Sheldakova J.V., Kudryashov A.V. Characterization of wave-front corrected 100 tW, 10 Hz laser pulses with peak intensities greater than 1020 w/cm^2 // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77, N 2. P. 023102-1–023102-7.
13. Sheldakova J.V., Kudryashov A.V., Zavalova V.Y., Cherezova T.Y. Beam quality measurements with Shack–Hartmann wavefront sensor and m2-sensor: comparison of two methods // Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering Laser Resonators and Beam Control IX. «Laser Resonators and Beam Control IX». San Jose, CA, 2007. V. 6452. P. 645207.

14. *Кудряшов А.В., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В., Александров А.Г.* Анализ способа компенсации волнового фронта при использовании датчика Шэка–Гартмана как элемента адаптивной оптической системы // Автометрия. 2012. Т. 48, № 2. С. 52–58.
15. *Samarkin V., Kudryashov A.* Deformable mirrors for laser beam shaping // Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering Laser Beam Shaping XI. «Laser Beam Shaping XI». San Diego, CA, 2010. V. 7789. P. 77890B.
16. *Lylova A., Kudryashov A.* Artificial model of human eye aberrations proceeded in real-time // AOIM2013, 9th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, 2–6 September 2013. Stellenbosch, South Africa. 2013. P. 30.
17. *Dayton D.C., Brown S.L., Sandven S.P., Gonglewski J.D., Kudryashov A.V.* Theory and laboratory demonstration on the use of a nematic liquid crystal phase modulator for controlled turbulence generation and adaptive optics // Appl. Opt. 1998. V. 37, N 24. P. 5579–5589.

A.L. Rukosuev, A.V. Kudryashov, A.N. Lylova, V.V. Samarkin, Yu.V. Sheldakova. **Adaptive optical system for real-time wavefront correction.**

Fast adaptive system for atmospheric turbulence compensation working with a frequency of 200 Hz is presented in this paper. As a stacked actuator, deformable mirror with 97 piezoactuators and 2 kHz Shack–Hartmann wavefront sensor were used for adaptive system design. The dependence of residual correction error of the sine signal upon the time of the system reaction is also considered.

