

ЛАБОРАТОРНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОРРЕКЦИИ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

*А.В. Кудряшов¹, Н.А. Кулаков², А.Н. Лылова², Г.Н. Мар¹,
А.Л. Рукосуев¹, В.В. Самаркин¹, Ю.В. Шелдакова¹*

¹ИДГ РАН, Москва

²Московский государственный политехнический университет

В работе рассматривается лабораторная адаптивная оптическая система для компенсации искажений мощного лазерного излучения, распространяющегося сквозь атмосферу Земли. Исследована возможность моделирования атмосферной турбулентности с помощью гибкого зеркала на пьезоприводах, представлены результаты коррекции фазовых искажений с помощью охлаждаемого биморфного зеркала.

Введение

В последнее время возрос интерес к возможностям беспроводной передачи энергии и информации с помощью оптических систем [Банах, Смалихо, 1993; Gupta, Mishra, 2011; Salter, 2015]. Однако следует отметить, что излучение, распространяющееся сквозь атмосферу Земли, искажается под воздействием атмосферной турбулентности и явления дифракции, в результате чего часть сигнала не достигает приемника. Как следствие, при беспроводной передаче сигналов возникает необходимость обеспечения надежности работы систем при различных погодных условиях. Одним из наиболее эффективных способов решения данной проблемы является использование адаптивной оптики для изменения профиля

волнового фронта за счет внесения фазовой задержки с помощью фазового корректора и, соответственно, компенсации искажений оптического сигнала, прошедшего сквозь атмосферу Земли [Рукусуев и др., 2015; Канев и др., 1995].

Для решения поставленной задачи в рамках настоящей работы предлагается построить лабораторную модель системы для моделирования доставки оптического излучения через атмосферную турбулентность.

Моделирование атмосферной турбулентности

Методы моделирования атмосферных фазовых искажений достаточно освещены в ряде работ. Существуют устройства как уже содержащие predetermined набор фазовых экранов для воспроизведения турбулентности [Burger et al., 2008], так и численные модели, с помощью которых можно рассчитывать характер искажений распространяющегося по воздушному каналу излучения для их дальнейшего воспроизведения с помощью фазового корректора [Gonglewski et al., 1997; Noll, 1976; Dudorov et al., 2006]. В настоящей работе был использован второй подход.

Для моделирования турбулентности на вертикальных трассах расстояние между источником излучения и мишенью разбивается на несколько частей, для каждой из которых моделируется собственный фазовый экран.

Традиционным подходом к моделированию фазового экрана является применение двумерного преобразования Фурье к спектру фазовых флуктуаций.

$$p(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} W(x, y) \cdot \exp(-i \cdot 2\pi(\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sqrt{u^2 + v^2})) dx dy, \quad (1)$$

где $p(u, v)$ – значение фазы в точке (u, v) , (x, y) – точка, принадлежащая спектральной плоскости, $W(x, y)$ – аппроксимированный винеровский спектр фазовых флуктуаций

$$W(x, y) = 0.023 \cdot \left(\frac{2D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \cdot (x^2 + y^2)^{-\frac{11}{3}}, \quad (2)$$

где D – диаметр апертуры, r_0 – радиус Фрида.

В результате дискретного преобразования Фурье спектра фазовых флуктуаций (1) получается фазовый экран. При этом значения фазы в каждой точке экрана пропорциональны количеству узлов сетки, по которым выполняется Фурье-преобразование. В реальной атмосфере амплитуда фазовых флуктуаций определяется структурной функцией турбулентности:

$$D = 6,88 \cdot \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}. \quad (3)$$

Таким образом, для вычисления значений фазы, соответствующих атмосферной турбулентности с заданными входными параметрами, необходимо нормировать данные, полученные в результате (1) согласно формуле (3).

Описанный алгоритм применяется для формирования экрана в условиях замороженности атмосферы. Это означает, что данная модель турбулентности не учитывает динамику фазовых флуктуаций в реальной среде. Для того, чтобы

учесть характер изменения фазы в атмосфере, использовалась модифицированная модель формирования фазовых экранов [Dudorov et al., 2006]:

$$p(u, v, t + \Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{W(x, y)} \cdot f(t + \Delta t) \cdot \exp(i \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \cdot V \cdot \Delta t), \quad (4)$$

где t – момент времени, в который генерируется первый фазовый экран последовательности, Δt – шаг дискретизации задачи по времени, V – поперечная скорость ветра,

$$f(x, y, t + \Delta t) = p \cdot f(x, y, t) + \sqrt{1 - p^2} \cdot \exp(i\varphi^1(x, y, t)), \quad (5)$$

где $p = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)$, τ – время замороженности атмосферы (параметр, характери-

зующий скорость эволюции экрана или скорость флуктуаций показателя преломления среды), $\Delta t \leq \tau$, $\varphi^1(x, y, t)$ – случайный дельта-коррелированный по времени и в пространстве спектральных амплитуд (x, y) фазовый множитель, равномерно распределенный в интервале $[0, 2\pi]$. Изначально рекурсивная функция f задается выражением:

$$f(x, y, t = 0) = \exp(i\varphi^1(x, y, t = 0)). \quad (6)$$

При $\tau = 0$ в каждый момент времени мы получаем новый фазовый экран. Случай, когда $V = 0$ соответствует полному отсутствию ветра или совпадению его направления с осью распространения пучка. С помощью описанного метода можно получить бесконечную последовательность фазовых экранов, коррелирующих между собой как во времени, так и в пространстве [Dudorov et al., 2006].

Адаптивные зеркала

Поскольку в работе проводилось как моделирование, так и компенсация фазовых искажений, вызванных турбулентностью, было использовано два фазовых корректора: зеркало на пьезоприводах и охлаждаемое биморфное зеркало, которое способно компенсировать искажения мощного лазерного излучения.

Зеркало на пьезоприводах (актюаторное зеркало, зеркало на толкателях) состоит из массива пьезотолкателей, приклеенных к стеклянной подложке, а также тонкой стеклянной пластины с нанесенным на нее отражающим покрытием. В качестве пьезотолкателей зеркала были использованы многослойные пьезокерамические пакеты. Подача положительных напряжений вызывала удлинение пьезопакета, а отрицательных – сужение, формируя локальный изгиб поверхности в области воздействия. Таким образом, прикладывая к актюаторам зеркала сигналы, различные по знаку и амплитуде, было возможно изменять профиль поверхности и, соответственно, корректировать фазу падающего на зеркало излучения [Рукоусев и др., 2015; Лукин, Фортес, 1999].

Зеркало на пьезоприводах обладает высоким быстродействием и позволяет компенсировать мелкомасштабные aberrации благодаря высокому пространственному разрешению. Предыдущие исследования показывают, что при моделировании атмосферной турбулентности наибольший вклад вносят низшие aberrации [Noll, 1976], иными словами, если отсутствует необходимость в рассмотрении мелкомасштабных фазовых неоднородностей, атмосферные искажения можно описать небольшим набором полиномов Цернике. В представленной работе



Рис. 1. Интерферограммы функций отклика зеркал: на пьезоприводах (а); биморфного (б)

фазовый экран описывался 15 первыми полиномами, для воспроизведения которых применялось зеркало на пьезоприводах с 19 элементами. Диапазон напряжений, подаваемых на зеркало: -50 В ... 200 В.

Для компенсации искажений мощного лазерного излучения в системе было использовано охлаждаемое биморфное зеркало. Оно представляло собой два жестко склеенных между собой пьезокерамических диска и стеклянную подложку с нанесенным на нее отражающим покрытием. Поверхность внутреннего пьезокерамического диска являлась сплошным металлическим электродом, в то время как для внешнего диска металлическое покрытие разделялось на сегменты. Приложение напряжений к пьезокерамическому актюатору вызывало расширение (или сужение – в зависимости от знака подаваемого напряжения) пьезокерамики в горизонтальном направлении. Однако приклеенная стеклянная подложка препятствовала расширению, тем самым обеспечивая изгиб поверхности. С помощью подачи сигнала на внутренний пьезокерамический диск становилось возможным изменить общую кривизну поверхности (дефокус). Подача напряжения на сектор внешнего диска вызывала, в свою очередь, локальный изгиб поверхности в месте воздействия. Остальная часть поверхности деформировалась в соответствии с граничными условиями [Samarkin et al., 2002].

К преимуществам биморфных зеркал относится их способность с высокой точностью воспроизводить низшие аберрации. В работе было использовано охлаждаемое по периферии биморфное зеркало с 32 электродами, диапазон напряжений: -200 В ... 300 В.

На рис. 1, а представлен пример функции отклика зеркала на пьезоприводах, на рис. 1, б – функции отклика биморфного зеркала. Можно заметить, что в первом случае отклик зеркала носит локальный характер, в то время как во втором – модальный.

Эксперимент по моделированию турбулентности

Рассмотрим использованную в работе экспериментальную установку. Схема адаптивной оптической системы представлена на рис. 2. Коллимированное излучение падало на зеркало на пьезоприводах, затем отражалось на биморфное зеркало и, наконец, фиксировалось датчиком Шака-Гартмана. Фазовые экраны моделировались с помощью программы на персональном компьютере, преобразо-

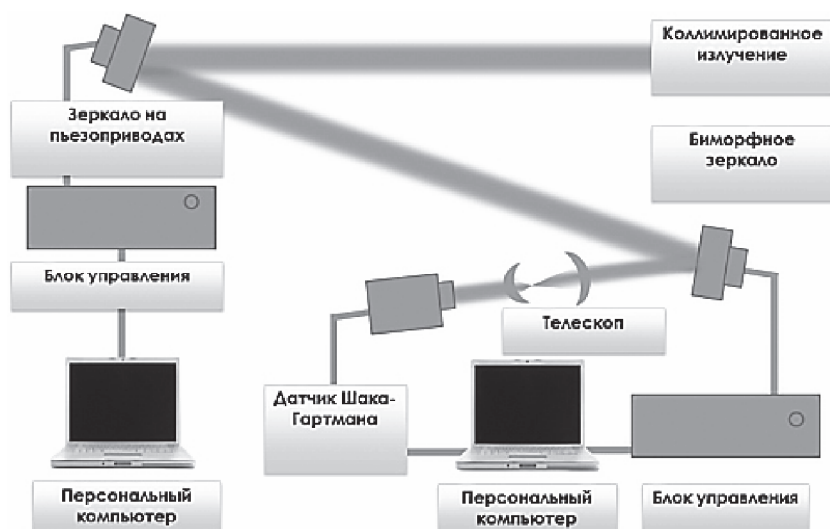


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для моделирования и коррекции атмосферной турбулентности в реальном времени

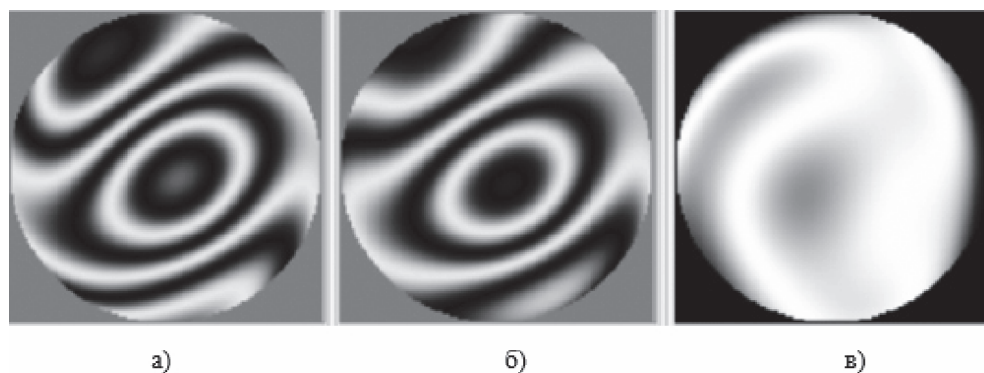


Рис. 3. Результаты моделирования фазового экрана с помощью деформируемого зеркала на пьезоприводах. Модельный фазовый экран, $PV = 1,113 \mu$, $RMS = 0,227 \mu$ (а); восстановленный с помощью зеркала фазовый экран, $PV = 0,958 \mu$, $RMS = 0,200 \mu$ (б); разность между модельным и восстановленным фазовыми экранами, $PV = 0,348 \mu$, $RMS = 0,050 \mu$ (в)

вывались в набор управляющих сигналов и подавались на актуаторы деформируемого зеркала на пьезоприводах с помощью блока управления. Управляющие напряжения для биморфного зеркала вычислялись в реальном времени на основе данных, получаемых с датчика Шака-Гартмана согласно алгоритму фазового сопряжения [Guang, 2002; Rukosuev et al., 2002]. Для моделирования атмосферной турбулентности использовались следующие параметры: соотношение диаметра

апертуры к радиусу когерентности $\frac{D}{r_0} = 10$, скорость ветра $V = 0,3$ м/с.

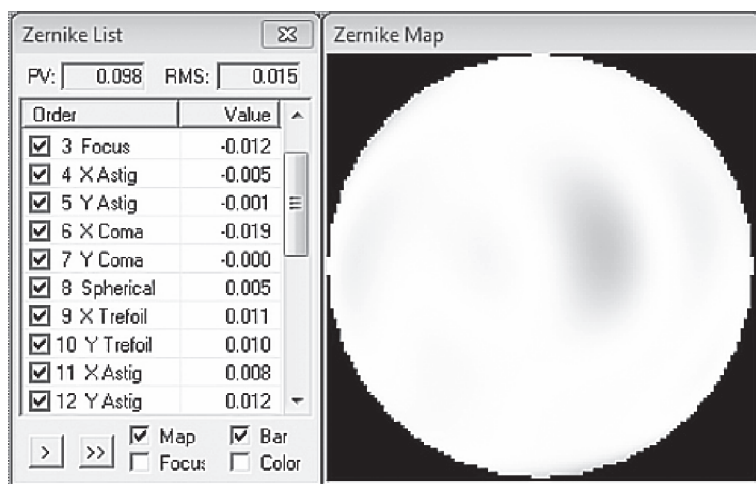


Рис. 4. Результаты коррекции фазовых искажений с помощью деформируемого биморфного зеркала

На рис. 3 представлены результаты восстановления фазового экрана с помощью деформируемого 19-элементного зеркала на пьезоприводах. Исходя из цифр, приведенных на рис. 3, можно заключить, что зеркало на пьезоприводах обеспечивает хорошую точность воспроизведения фазового экрана при рассмотрении первых 15 aberrаций волнового фронта.

На рис. 4 представлена коррекция фазовых искажений, внесенных в систему зеркалом на пьезоприводах с 19 актюаторами, с помощью охлаждаемого биморфного зеркала с 32 электродами. Стоит отметить, что в лабораторных условиях была достигнута хорошая коррекция фазовых искажений.

Заключение

В настоящей работе была рассмотрена лабораторная адаптивная оптическая система для моделирования и компенсации атмосферной турбулентности в реальном времени. Были представлены результаты воспроизведения фазовых экранов с помощью 19-актюаторного зеркала на пьезоприводах, которое показало высокую точность воспроизведения. Также были продемонстрированы результаты компенсации фазовых искажений (соответствующих атмосферным) с помощью 32-электродного биморфного охлаждаемого зеркала. В заключение можно утверждать, что представленная лабораторная система коррекции атмосферных искажений подходит для компенсации атмосферной турбулентности в задачах распространения мощного лазерного излучения на вертикальной трассе.

Литература

Банах В.А., Смалихо И.Н. Распространение лазерных пучков на вертикальных и наклонных трассах через турбулентную атмосферу // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 4. С. 377-384.

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 атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 3. С. 419-427.

Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук Г.Г. Матвиенко. Новосибирск: изд-во СО РАН, 1999. 214 с.

Рукоусев А.Л., Кудряшов А.В., Лылова А.Н., Самаркин В.В., Шелдакова Ю.В. Адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта в реальном времени // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 189-195.

Burger L., Litvin I., Forbes A. Simulating atmospheric turbulence using a phase-only light modulator // South African Journal of Science. 2008. V. 104. P. 129-134.

Dudorov V., Kolosov V., Filimonov G. Algorithm for formation of an infinite random turbulent screen // Proc. of SPIE 6160, 61600R1-61600R8 (2006).

Gonglewski J., Kudryashov A.V., Browne S., Highland R. Liquid crystal phase modulators for time varying phase distortion simulations // Aerospace Remote Sensing Conf., Technical Programme, Sept. 22-26, 1997. London. P. 50.

Guang S. Optical phase conjugation: principles, techniques, and applications // Progress in Quantum Electronics. 2002. V. 26. P. 131-191.

Gupta A.K., Mishra S.K. Development of Adaptive Optics Imaging System at IRDE // Proceedings of XXXV OSI Symposium, International Conference on Contemporary Trends in Optics and Opto Electronics January 17-19, 2011. Thiruvananthapuram, India. 2011. P. 19-21.

Noll R. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Optical Society of America. 1976. V. 66. I. 3. P. 207-211.

Rukosuev A.L., Alexandrov A., Zavalova V.Ye., Samarkin V.V., Kudryashov V. Adaptive optical system based on bimorph mirror and Shack-Hartmann wavefront sensor // Proc. SPIE 4493. 2002. P. 261-268.

Salter A.W. Space Debris // A Law and Economics Analysis of the Orbital Commons: Mercatus Working Paper. Mercatus Center at George Mason University, September 2015. Arlington, Virginia.

Samarkin V.V., Aleksandrov A.G., Kudryashov A.V. Bimorph mirrors for powerful laser beam correction and formation // Proc. SPIE 4493. 2002. P. 269-276.