

УДК 535.23

Зависимость эффективности компенсации турбулентных искажений многоканального излучения от метода управления фазой. Повышение эффективности при управлении амплитудой

О.Л. Антипов¹, Ф.Ю. Канев², В.П. Лукин², Н.А. Макенова^{2*}

¹ Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 12.08.2016 г.

Представлены результаты численных экспериментов, характеризующие распространение многоканального лазерного излучения в атмосфере, и рассмотрена возможность компенсации турбулентных искажений с использованием фазового управления. Показано, что эффективность адаптивной коррекции зависит от числа каналов системы и точности воспроизведения фазы опорного излучения. Дополнительное увеличение эффективности достигается при регулировании усиления в каждом из каналов, т.е. при переходе к амплитудно-фазовому управлению.

Ключевые слова: многоканальные оптические системы, атмосферная турбулентность, адаптивное управление излучением, фазовое сопряжение; multichannel optical systems, atmospheric turbulence, adaptive control of radiation, phase conjugation.

Введение

Для генерации лазерного излучения высокой мощности в настоящее время широко применяются многоканальные системы с когерентным сложением пучков [1–5]. В таких системах каждый из каналов включает усилители и устройства, предназначенные для управления фазовым сдвигом, для введения которого используются электрооптические ячейки [3, 4], нелинейно-оптические элементы [1, 2], пьезооптические устройства или другие элементы [6].

Интерес исследователей к подобным системам обусловлен тем, что в стандартном одномодовом лазерном источнике максимальная передаваемая мощность ограничена нелинейными эффектами, возникающими как в активной среде генератора, так и в атмосфере. Плотность мощности источника и влияние нелинейных эффектов на качество излучения могут быть уменьшены за счет разделения выходного излучения на несколько каналов, каждый из которых проходит через массив параллельных усилителей (рис. 1). На объекте фокусировки

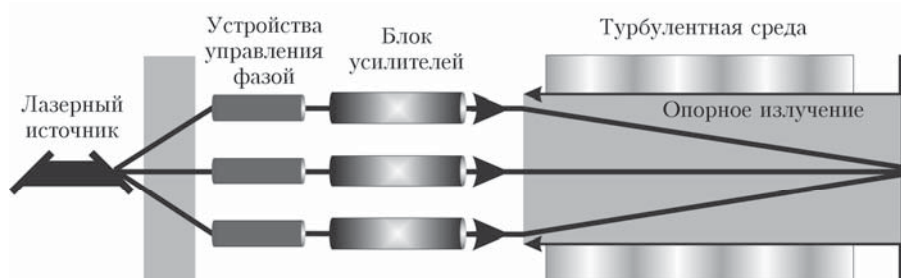


Рис. 1. Схематическое изображение многоканальной оптической системы, включающей контур адаптивного управления излучением

* Олег Леонидович Антипов (antipov@appl.sci-nnov.ru); Федор Юрьевич Канев (kanev@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Наиля Алтынхановна Макенова.

осуществляется сложение каналов, целью которого является получение излучения высокой интенсивности.

Как в любой относительно новой и развивающейся области науки, в рассматриваемом разделе большое количество результатов получено на основе

методов численного эксперимента [7–9]. По-видимому, наиболее полный теоретический анализ распространения излучения в среде без искажений и в турбулентной атмосфере приводится в статьях [7, 8]. Авторами публикаций показано, что в условиях свободной дифракции при плотной упаковке массива излучателей и достаточно большом их количестве (от 19 до 37) многоканальная система обеспечивает приблизительно такие же характеристики поля (оценивалась пиковая интенсивность и мощность, попадающая в пределы заданной апертуры), как гауссов пучок с диаметром, равным диаметру всей области, занимаемой элементарными апертурами.

Во второй части работы [8] было рассмотрено распространение излучения в турбулентной среде. Искажения задавались одним фазовым экраном, расположенным в плоскости передающей апертуры. При отсутствии ограничений на воспроизводимый волновой фронт и ошибок регистрации фазы опорного излучения единственный фазовый экран может быть скомпенсирован полностью, независимо от интенсивности задаваемых им искажений [10]. Поэтому и в статье [8] демонстрировалась высокая эффективность применения методов адаптивной оптики.

Кроме теоретического изучения коррекции искажений в многоканальной системе, активно ведутся экспериментальные исследования данной проблемы, прежде всего интерес привлекает уменьшение влияния аберраций, возникающих в самой установке. Для этого часто применяются пассивные методы, такие как демпфирование механических колебаний и снижение акустических шумов. Когда эффективность пассивной компенсации исчерпывается, в систему вводятся обратная связь и активное управление относительными фазовыми сдвигами в каналах. Экспериментальная реализация адаптивного управления многоканальным излучением описана в [2] для системы, включающей два канала, и в [5] для семи каналов.

Естественное продолжение экспериментов в данной области – это попытка коррекции искажающего влияния атмосферы. Первые эксперименты были проведены в лабораторных условиях [11], когда турбулентные вариации показателя преломления создавались мощным вентилятором. Для управления пучком использовался алгоритм стохастического параллельного спуска [12], результатом его применения являлось увеличение контраста интерференционной картины.

Один из известных натуральных экспериментов в данной области был описан в работе [13]. Авторами публикации изучалась компенсация искажений, возникающих в оптической мультипучковой системе, вносимых турбулентностью на атмосферной трассе длиной 7 км, проходящей между двумя зданиями. Система включала семь каналов. В рассматриваемой статье было отмечено, что эффективность системы зависит как от ее быстродействия, так и от используемого алгоритма управления волновым фронтом излучения.

Анализ литературных источников показывает, что, несмотря на достигнутый в данной области

значительный прогресс, нерешенным остается ряд проблем, имеющих фундаментальное и прикладное значение. В частности, неполным является исследование возможности компенсации протяженного слоя турбулентной атмосферы и влияния точности задания фазы опорного излучения на качество коррекции турбулентных искажений. Данные проблемы рассматриваются в настоящей статье.

1. Модель многоканальной оптической системы

Принципиальная схема многоканального лазерного генератора с замкнутой обратной связью [1, 3, 7, 9] изображена на рис. 1, приводимые в настоящей статье результаты были получены при моделировании именно этой системы. Опорное излучение распространялось во встречном относительно корректируемого сигнала направлении, являлось гауссовым пучком с диаметром большим, чем диаметр генерируемого многоканальной системой излучения (направление и относительные размеры пучков показаны на рис. 1).

Адаптивная коррекция атмосферных искажений осуществлялась с использованием алгоритма фазового сопряжения, в котором управляющие сигналы формировались на основе измерений фазового профиля опорного пучка. Полагалось, что устройства управления фазой задают наклоны и фазовые сдвиги в каждом из каналов. При исследовании амплитудно-фазового управления, анализ которого также проведен в статье, варьировалось усиление в каналах.

В используемой численной модели распространение многоканального излучения в турбулентной среде описывалось уравнением квазиоптики [14]:

$$2ik \left(\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{v_{gr}} \frac{\partial E}{\partial t} \right) = \Delta_{\perp} E + \frac{2k^2}{n_0} \tilde{n} E,$$

где $E(x, y, z)$ – комплексная амплитуда светового поля, x, y – координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка, z – координата в направлении распространения; k – волновое число; $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ – оператор Лапласа; v_{gr} – групповая скорость излучения; \tilde{n} – случайное поле флуктуаций показателя преломления, обусловленных турбулентностью. Граничные условия для гауссова пучка (т.е. распределение амплитуды в плоскости излучающей апертуры) задавались выражением

$$E_0(x, y) = A_0 \exp[-(x^2 + y^2)/2a_0^2],$$

в котором A_0 – значение амплитуды пучка при $x = 0, y = 0$; a_0 – его начальный радиус. В соответствии с этим комплексная амплитуда светового поля на входе в среду определялась как

$$E(x, y) = E_0 \exp[i\varphi(x, y)].$$

Здесь $\varphi(x, y)$ – фазовый профиль излучения. При моделировании многоканальной системы на расчет-

ной сетке размещались несколько гауссовых пучков, число которых было ограничено разрешением модели (размерностью расчетной сетки).

Учет турбулентных возмущений был выполнен на основе метода расщепления по физическим факторам [15], в котором сплошная среда представлялась набором фазовых экранов, в промежутках между которыми пучок распространялся без искажений. Интенсивность флуктуаций показателя преломления задавалась радиусом Фрида r_0 , однозначно связанным со структурной постоянной показателя преломления атмосферы [14]. При моделировании радиус Фрида нормировался на начальный радиус пучка.

Для количественной характеристики светового поля в плоскости наблюдения использовался критерий фокусировки

$$J(t) = \frac{1}{P_0} \iint_{S_t} \rho(x, y) I(x, y, t) dx dy,$$

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиуса S_t . В приведенной формуле P_0 — полная мощность пучка (в случае многоканального излучения — суммарная мощность всех пучков); $\rho(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/S_t^2)$ — апертурная функция; $I(x, y, t)$ — интенсивность излучения. При заданной нормировке увеличение количества элементарных пучков, формирующих излучение, не приводит к увеличению критерия.

2. Компенсация тонкого турбулентного слоя на основе фазового управления излучением

Для определения влияния точности задания фазового профиля на качество коррекции искажений рассматривалась компенсация тонкого турбулентного слоя, задаваемого одним фазовым экраном, расположенным в начале трассы распространения. Была выбрана именно такая геометрия задачи, потому что известно о возможности полной компенсации тонкого слоя на основе фазового управления [16], соответственно, результаты коррекции могут быть сопоставлены с данными, характеризующими распространение пучка в неискажающей среде.

В каждом из каналов управление фазой осуществлялось с помощью сдвигов типа «поршень» и наклонов, вычисляемых с использованием метода наименьших квадратов. Точность задания характеризовалась квадратичным отклонением ϵ полученного фазового профиля от требуемого [16, 17]. Количество каналов оптической системы варьировалось в широких пределах.

Для излучения, сформированного тринадцатью каналами (при меньшем числе каналов наблюдалось резкое увеличение квадратичного отклонения ϵ), поперечное сечение фазового профиля опорного и генерируемого пучков, а также распределение амплитуды в плоскости наблюдения, полученное в результате коррекции, приводятся на рис. 2 и 3. Из представленных результатов видно, что при

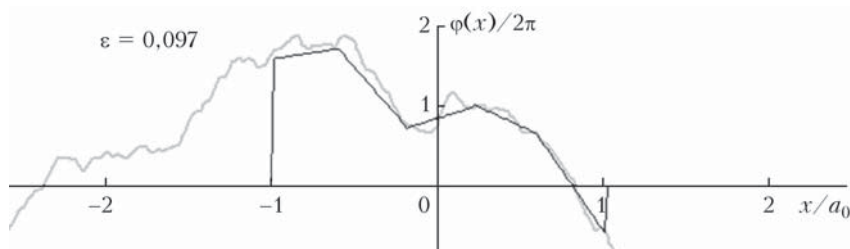


Рис. 2. Поперечные сечения фазы опорного (пунктирная линия) и генерируемого излучения (13 каналов). Здесь и на рис. 4 указана квадратичная ошибка задания фазового профиля пучка, поперечная координата x нормирована на начальный радиус излучения

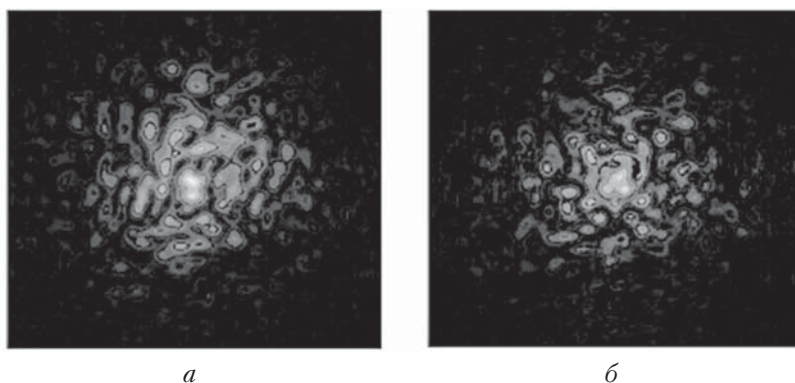


Рис. 3. Распределение амплитуды в плоскости наблюдения до выполнения коррекции (а) и амплитуды, полученной в результате коррекции (б). Изменение критерия фокусировки от 0,61 до 0,64

выбранном числе каналов квадратичная ошибка задания фазы составляет почти 10%, а увеличение критерия фокусировки в результате адаптивного управления приблизительно равно 5%, т.е. точность формирования фазы пучка на входе в искажающую среду и эффективность коррекции турбулентности являются очень низкими.

Данные, аналогичные приведенным выше, но для системы, включающей 90 каналов, показаны на рис. 4 и 5.

При генерации излучения полный энергетический радиус пучка оставался без изменений, увеличение числа оптических волокон достигалось за

счет уменьшения их диаметра. Можем видеть, что за счет увеличения числа каналов была в два раза уменьшена квадратичная ошибка задания фазы (рис. 4) и значительно повышена эффективность коррекции (рис. 5), применение которой обеспечило возрастание критерия от 0,47 до 0,92, т.е. почти в два раза.

Для оценки эффективности применения фазового сопряжения в многоканальной системе была получена зависимость критерия фокусировки, регистрируемого в результате коррекции искажений, от радиуса Фрида (рис. 6), при этом результаты усреднялись по 100 реализациям случайного экрана.

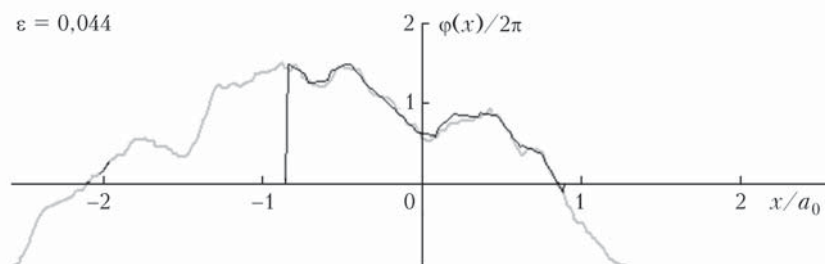


Рис. 4. Поперечные сечения фазы опорного (полутонная линия) и генерируемого излучения (90 каналов)

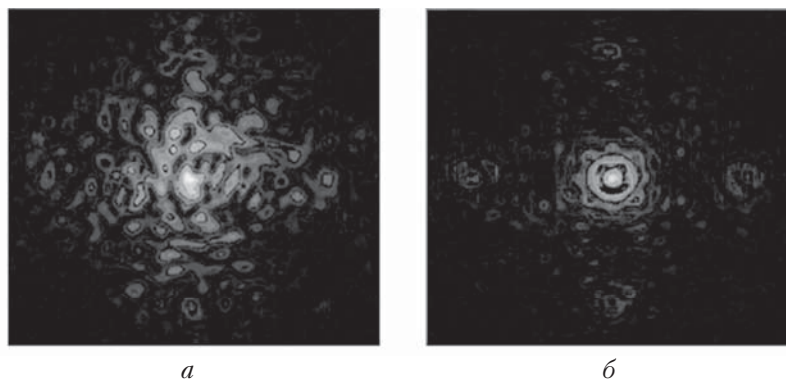


Рис. 5. Распределение амплитуды в плоскости наблюдения до выполнения коррекции (а) и амплитуды, полученной в результате коррекции (б). Число каналов увеличено до 90. Изменение критерия фокусировки от 0,47 до 0,92

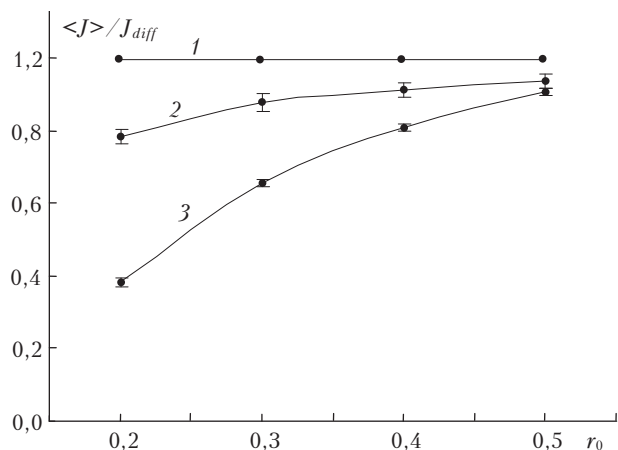


Рис. 6. Усредненные по 100 реализациям турбулентного экрана значения критерия фокусировки, полученные при компенсации тонкого слоя атмосферы. Кривая 1 – полная компенсация; 2 – адаптивная коррекция искажений пучка, сформированного с помощью 90 каналов, и 3 – 13 каналов

Критерий был нормирован на дифракционно-ограниченное значение этой величины, регистрируемое для колимированного пучка. Графики показывают увеличение результирующих значений $\langle J \rangle$ при увеличении числа каналов. Особенно это проявляется в условиях значительных искажений, когда значения радиуса Фрида r_0 малы ($r_0 < 0,3$).

Отметим еще одну особенность адаптивной фокусировки на основе предлагаемого метода. Так, на рис. 7 иллюстрируется точность формирования фазы излучения при задании в каждом из каналов только сдвигов типа «поршень» (в предыдущих примерах фаза задавалась наклонами и сдвигами, в данном – число степеней свободы уменьшено). Несмотря на то что число каналов оставалось равным 90, в данном численном эксперименте квадратичная ошибка увеличилась до 8,3%, соответственно, уменьшилось возрастание результирующих значений критерия. Теперь в результате коррекции критерий возрастает от 0,56 до 0,81, тогда как

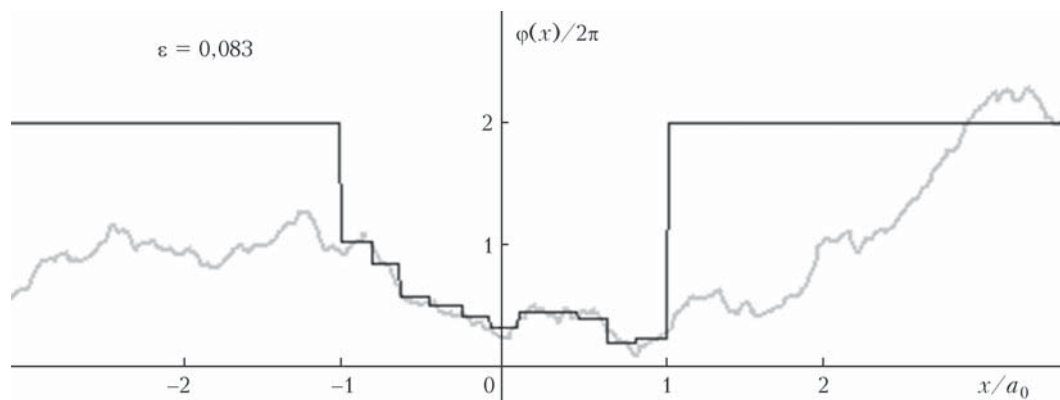


Рис. 7. Поперечные сечения фазы опорного (полутоновая линия) и генерируемого излучения (90 каналов). Фазовый профиль задавался только смещениями типа «поршень»

увеличение критерия при управлении сдвигами и наклонами было зарегистрировано в диапазоне от 0,56 до 0,92. Таким образом, удаление наклонов из базиса координат управления привело к значительному снижению качества адаптивной компенсации тонкого турбулентного слоя.

3. Компенсация распределенного турбулентного слоя с использованием фазового и амплитудно-фазового управления излучением

Компенсация тонкого слоя турбулентной атмосферы, анализ которой был выполнен в предыдущем разделе, позволяет оценить влияние точности задания фазы на качество коррекции искажений. В то же время в реальных условиях необходимым является выполнение адаптивной фокусировки в распределенном слое искажающей среды. Для решения данной задачи было рассмотрено управление пучком при задании турбулентных искажений несколькими экранами, равномерно расположенными на трассе распространения.

Известно [16], что полная компенсация протяженной искажающей линзы достигается только при амплитудно-фазовом управлении. Отметим, что данный метод трудно реализуем в системах, где при-

сутствует только один пучок, и для управления амплитудой необходимо использование жидкокристаллических модуляторов или нескольких гибких зеркал (анализ амплитудно-фазового управления гауссовым пучком проведен в работах [17, 18]). В то же время в многоканальной системе изменение амплитуды может быть получено при управлении усилением в каждом из каналов. Пример задания требуемого распределения, приближающегося к распределению амплитуды опорного излучения, показан на рис. 8, а соответствующие результаты коррекции приводятся на рис. 9. Можно видеть, что остаточные искажения распределения амплитуды являются незначительными.

Отметим, что получение удовлетворительных результатов потребовало дальнейшего увеличения числа каналов системы. В рассматриваемом примере оно равно 130, при меньшем числе элементарных пучков, формирующих выходное излучение, эффективность применения метода является очень низкой.

Усредненные значения критерия фокусировки, регистрируемые при фазовом и амплитудно-фазовом управлении в турбулентной атмосфере, представлены на рис. 10. Фазовая коррекция проводилась при задании наклонов и сдвигов в каналах, кроме этого, при амплитудно-фазовом управлении регулировалось усиление каждого из пучков.

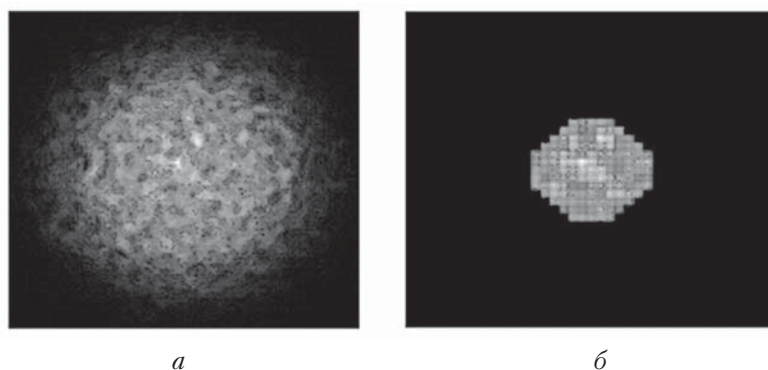


Рис. 8. Амплитудное распределение опорного (а) и корректируемого (б) излучения (130 каналов)

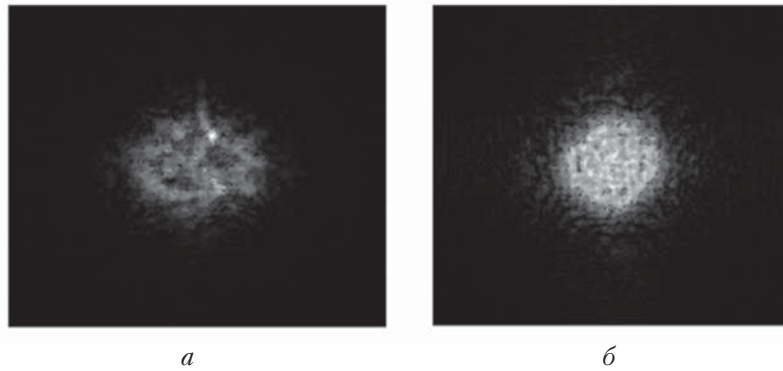


Рис. 9. Распределение излучения в плоскости наблюдения при разомкнутом контуре управления (а) и полученное в результате коррекции (б)

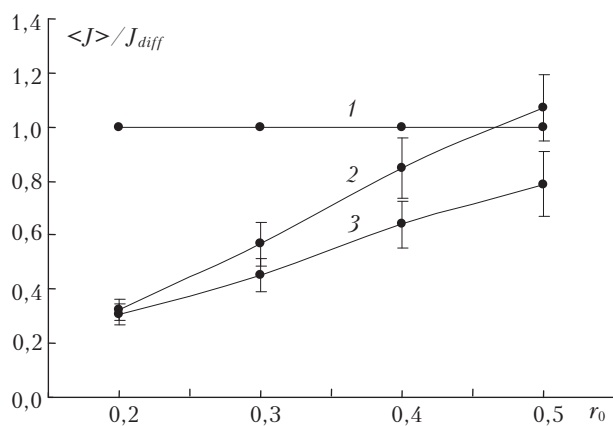


Рис. 10. Усредненные по 100 реализациям случайных экранов значения критерия фокусировки, полученные при компенсации распределенного слоя турбулентной атмосферы. Кривая 1 – полная компенсация (наблюдается только при использовании обращения волнового фронта); 2 – результат амплитудно-фазового управления; 3 – коррекция искажений на основе фазового управления. Излучение сформировано 130 каналами

При значительных искажениях ($r_0 < 0,3$) значения критерия для обоих типов управления отличаются незначительно. При увеличении интенсивности турбулентности амплитудно-фазовое управление позволяет получить более высокие (на 40–50%) результаты по сравнению с чисто фазовым управлением.

Заключение

Рассмотрены возможности адаптивной компенсации турбулентных искажений многоканального излучения на основе фазового и амплитудно-фазового управления излучением.

Показано, что эффективность коррекции тонкого турбулентного слоя зависит от числа каналов оптической системы и базиса координат управления. В условиях сильных турбулентных искажений увеличение числа каналов от 13 до 90 без увеличения энергетического радиуса пучка обеспечивает увеличение плотности мощности в плоскости наблюдения почти в два раза. При низкой интенсивности турбулентности мощность на объекте фоку-

сировки, полученная в результате управления, приближается к дифракционно-ограниченной величине этого параметра.

Полная компенсация распределенного турбулентного слоя не может быть достигнута в результате чисто фазового управления даже при большом числе каналов (130 каналов) оптической системы. В то же время увеличение эффективности управления в этом случае наблюдается при регулировке усиления каждого из пучков, формирующих выходное излучение, т.е. при переходе к амплитудно-фазовому управлению.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 16-45-700876.

1. *Bruesselbach H., Wang S., Minden M., Jones D.C., Mangir M.* Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere // *J. Opt. Soc. Amer. B.* 2005. V. 22, N 2. P. 347–354.
2. *Fotiadi A.A., Zakharov N., Antipov O.L., Megret P.* All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers // *Opt. Lett.* 2009. V. 34, N 22. P. 3574–3576.
3. *Fan T.Y.* Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2005. V. 11, N 3. P. 567–572.
4. *Grime B.W., Roh W.B., Alley Th.G.* Phasing of a two-channel continuous-wave masteroscillator-power amplifier by use of a fiber phase-conjugate mirror // *Opt. Lett.* 2005. V. 30, N 18. P. 2415–2417.
5. *Xinyan Fan, Jingjiao Liu, Jinsheng Liu, Jingli Wu.* Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array // *Chinese Opt. Lett.* 2010. V. 8, N 1. P. 48–51.
6. *Bellanger C., Brignon A., Colineau J., Huignard J.P.* Coherent fiber combining by digital holography // *Opt. Lett.* 2008. V. 33, N 24. P. 2937–2939.
7. *Vorontsov M.A., Lachinova S.I.* Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic consideration for analysis // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2008. V. 25, N 8. P. 1949–1959.
8. *Vorontsov M.A., Lachinova S.I.* Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. II. Analysis of atmospheric compensation efficiency // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2008. V. 25, N 8. P. 1960–1973.
9. *Банах В.А., Фалиц А.В.* Оценка эффективности фокусировки многоэлементного пучка в условиях теплового

- самовоздействия // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 11–17; *Banakh V.A., Falits A.V.* Efficiency of combined beam focusing under thermal blooming // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 3. P. 211–217.
10. *Kanev F.Yu., Lukin V.P., Lavrinova L.N.* Possibility of adaptive correction for atmospheric turbulent layer // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 135–139.
 11. *Pu Zhou, Yanxing Ma, Xiaolin Wang, Haotong Ma, Jianhua Wang, Xiaojun Xu, Zejin Liu.* Coherent beam combination of a hexagonal distributed high power fiber amplifier array // Appl. Opt. 2009. V. 48, N 33. P. 6537–6540.
 12. *Vorontsov M.A., Carhart G.W.* Adaptive wavefront control with asynchronous stochastic parallel gradient descent clusters // J. Opt. Soc. Amer. A. 2006. V. 23, N 10. P. 2613–2622.
 13. *Weyrauch T., Vorontsov M.A., Carhart G.W., Beresnev L.A., Rostov A.P., Polnau E.E., Liu J.J.* Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path // Opt. Lett. 2011. V. 36, N 22. P. 4455–4457.
 14. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
 15. *Марчук Г.И.* Методы расщепления. М.: Наука. 1988. 264 с.
 16. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Мakenова Н.А., Моисей Е.И.* Новый алгоритм формирования требуемого распределения амплитуды при управлении фазой. Повышение эффективности двухзеркальной адаптивной системы // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, N 4. С. 368–374.
 17. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П.* Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 254 с.
 18. *Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Сенников В.А., Мakenова Н.А., Тартаковский В.А., Коняев П.А.* Фазовое и амплитудно-фазовое управление лазерным пучком при распространении его в атмосфере // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 9. С. 825–832.

O.L. Antipov, F.Yu. Kanev, V.P. Lukin, N.A. Makenova. Dependence of the effectiveness of multichannel radiation turbulent distortion compensation on the method of phase control. Increase of the effectiveness under control of amplitude.

In this report, the results of simulation are presented of multichannel radiation propagation in the atmosphere. Correction of turbulent distortions on the basis of the beam phase control is considered. The results demonstrate the dependence of the correction effectiveness on the number of channels and on precision of reference beam phase reconstruction. Additional increase of the effectiveness is possible with adjustment of amplification in the channels of the optical system, i.e., with the use of amplitude-phase control of radiation.