

УДК 535.23

АДАПТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

О. Л. Антипов¹, Ф. Ю. Канев², Н. А. Макенова²,
В. П. Лукин², Е. И. Цыро²

¹Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
²Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН,
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
E-mail: mna@iao.ru

Представлены результаты моделирования распространения многоканального излучения в условиях свободной дифракции и отмечены особенности, проявляющиеся у данного типа пучков в указанных условиях. Также рассмотрено влияние на качество излучения искажений, возникающих в турбулентной атмосфере, и выполнен анализ эффективности адаптивной компенсации атмосферной турбулентности.

Ключевые слова: многоканальные оптические системы, атмосферная турбулентность, фазовое сопряжение.

Введение. Актуальность данной работы обусловлена широким использованием многоканальных оптических систем для генерации лазерного излучения высокой мощности [1–9]. В таких системах каждый из каналов включает в себя усилители и устройства управления относительным фазовым сдвигом, для введения которого применяются электрооптические ячейки [1, 5], нелинейно-оптические элементы [2, 6], пьезооптические устройства или другие элементы [3, 4]. Интерес также представляют результаты исследований многоканальных систем с фазировкой излучения каждого из каналов за счёт нелинейно-оптического неуправляемого взаимодействия пучков, достигаемой при использовании оптических волокон с несколькими активными сердцевинами [7–9].

Целью предлагаемого исследования являлось построение численной модели многоканальной системы, изучение особенностей её работы в неискажающей среде, оценка влияния атмосферных искажений на качество пучков и выполнение адаптивной коррекции атмосферной турбулентности в численном эксперименте.

Постановка задачи. Принципиальная схема многоканального лазерного генератора изображена на рис. 1. Приведённые численные результаты были получены при моделировании именно этой системы. Система, имеющая подобную оптическую схему, но включающая только два канала, описана в экспериментальной работе [6].

В используемой численной модели распространение многоканального излучения в турбулентной среде описывалось уравнением квазиоптики [10]

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

где $E(x, y, z)$ — комплексная амплитуда светового поля (x, y — координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка, z — координата в направлении распространения); $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — оператор Лапласа; v_{gr} — групповая скорость; \tilde{n} — случайное поле флуктуаций показателя преломления, обусловленных турбулент-

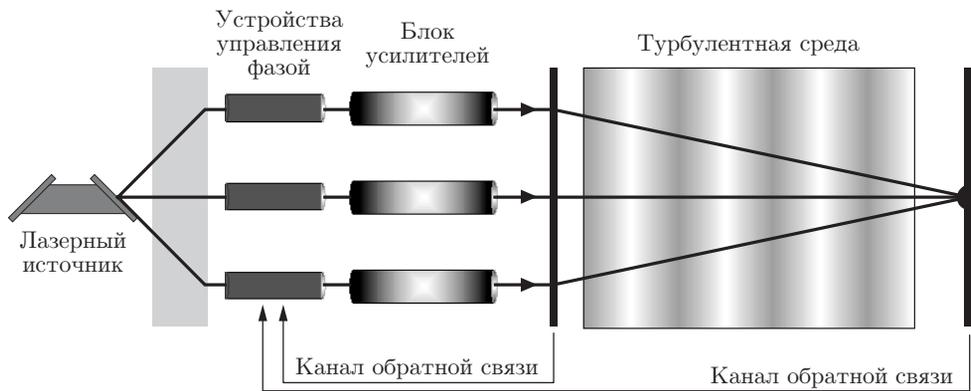


Рис. 1. Схематическое изображение многоканальной оптической системы, включающей контур адаптивного управления излучением

ностью. Граничные условия для гауссовского 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 при $x = 0$, $y = 0$; a_0 — начальный радиус пучка. В соответствии с этим комплексная амплитуда светового поля на входе в среду определялась как

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

($\varphi(x, y)$ — фазовый профиль излучения). При моделировании многоканальной системы на расчётной сетке размещалось несколько гауссовских пучков, число которых ограничено разрешением модели (размерностью сетки), после чего решение уравнения осуществлялось с использованием быстрого преобразования Фурье.

Учёт турбулентных возмущений был выполнен на основе метода расщепления по физическим факторам, где сплошная среда представлялась набором фазовых экранов, в промежутках между экранами пучок распространялся без искажений. Интенсивность флуктуаций показателя преломления задавалась радиусом Фрида r_0 , однозначно связанным со структурной постоянной показателя преломления атмосферы [6].

Распространение многоканального излучения в условиях свободной дифракции. Рассмотрим распространение излучения, генерируемого многоканальной системой в среде без искажений. В численной модели количество каналов N варьировалось от 4 до 448. Для количественной характеристики светового поля в плоскости наблюдения использовался критерий фокусировки

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

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиуса S_t . В приведённой 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 многоканальное излучение, не приводит к увеличению критерия фокусировки, что позволяет проводить сравнение полученных результатов с данными, характеризующими гауссовское излучение.

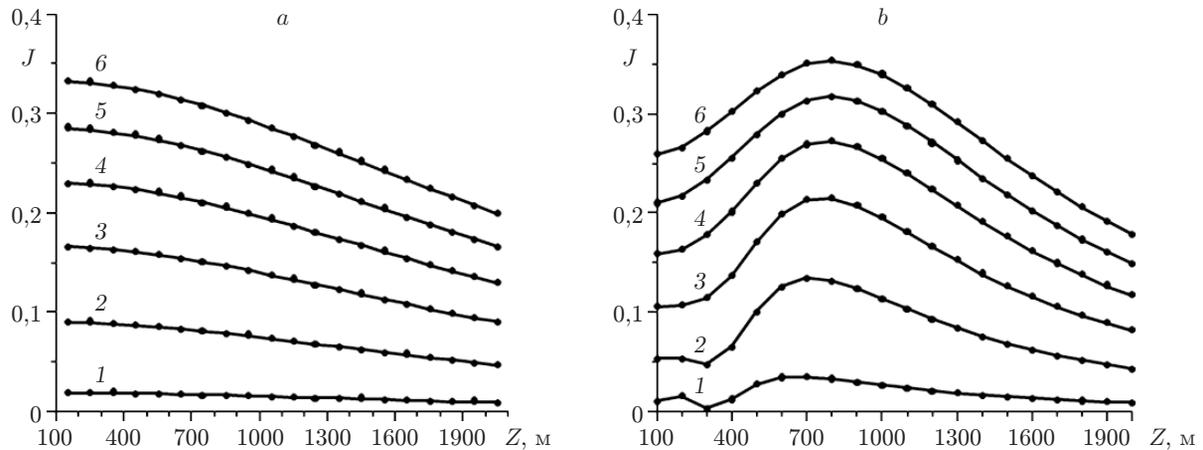


Рис. 2. Значения критерия фокусировки, зарегистрированные в различных сечениях трассы распространения: *a* — для гауссовского пучка, *b* — для мультисканального излучения (45 каналов). Вычисления критерия осуществлялись в апертурах с радиусом, равным одному начальному радиусу элементарного пучка многоканальной системы (кривые 1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5) и 25 (6) радиусам

Изменения критерия фокусировки вдоль трассы при распространении гауссовского пучка и многоканального излучения приводятся на рис. 2. В обоих случаях полная длина трассы составляла около 2000 м (расстояние, близкое к дифракционной длине гауссовского пучка с радиусом 1 см и длиной волны, попадающей в видимый диапазон), в плоскости $Z = 0$ радиусы апертур гауссовского пучка и многоканального генератора одинаковы.

Так как регистрация энергии и вычисление критерия фокусировки в обоих случаях выполнялись для одинакового набора апертур, соответствующие значения в плоскости $Z = 0$ для гауссовского и многоканального излучений являются приблизительно одинаковыми. Например, кривые 1 на рис. 2, *a, b* начинаются в одной точке, а отличие значений критерия в начале трассы для кривых с более высокими номерами можно объяснить наличием промежутков между каналами. При дальнейшем распространении большая концентрация энергии (в максимуме для многоканального пучка различие достигает 20–50 %) наблюдается для мультисканального излучения.

Приведённые далее данные позволяют оценить зависимость энергетических характеристик мультисканального излучения от начального диаметра излучающей апертуры (рис. 3). Анализ проведён для систем, включающих различное число каналов, регистрация мощности выполняется в пределах апертуры с радиусом, равным 10 радиусам одного канала (т. е. основой для сравнения является кривая 3 на рис. 2, *b*).

При варьировании начального радиуса пучка без изменения плотности заполнения апертуры кривые, характеризующие значения критерия в различных точках трассы распространения, проходят максимум, затем наблюдается уменьшение значений (рис. 4). Также видно, что для пучков с большим диаметром экстремум находится на больших расстояниях от генератора. Поскольку плотность заполнения апертуры в численных экспериментах не изменялась, увеличение начальных размеров составного пучка достигалось за счёт роста числа каналов. При этом введённая в формуле (1) нормировка позволила получить в плоскости $Z = 0$ одинаковые значения критерия для пучков различных радиусов (на рис. 3 все кривые начинаются на одном уровне).

Приведённые результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. При использовании многоканальной системы для передачи энергии в неискажающей среде зависимость значений критерия фокусировки от длины трассы имеет характерный

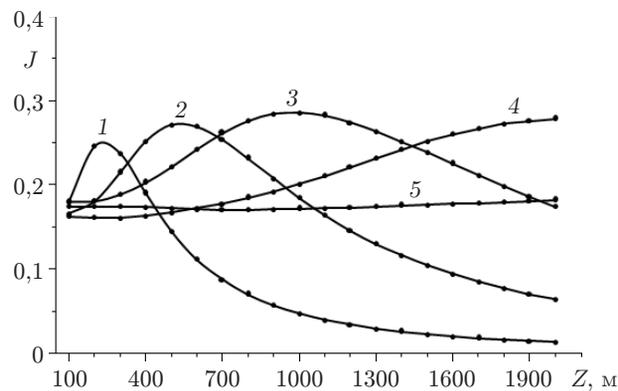


Рис. 3. Значения критерия фокусировки в различных точках трассы распространения, полученные при различных размерах излучающей апертуры. Излучение было сформировано 12 (кривая 1), 45 (2), 81 (3), 177 (4) и 448 (5) каналами

максимум. При одинаковых диаметрах излучающей апертуры многоканального и гауссовского пучков концентрация энергии в максимуме для первого на 20–50 % больше (данные рис. 3).

2. Расстояние от излучающей апертуры до точки экстремума зависит от начального диаметра апертуры многоканального пучка. При увеличении диаметра это расстояние растёт (см. рис. 3).

Искажения, обусловленные турбулентностью. Адаптивная коррекция искажений. Многоканальное излучение в турбулентной атмосфере испытывает значительные искажения, интенсивность которых определяется величиной радиуса Фрида. Количественные данные, характеризующие влияние атмосферной турбулентности на качество пучка, представлены на рис. 4, где показана зависимость усреднённых значений критерия фокусировки J от интенсивности искажений, данные нормированы на дифракционно-ограниченное значение J_{dif} , система включала 9, 37, 81, 137, 201 канал.

Как и в задачах с гауссовским пучком [7], средние значения критерия уменьшались с увеличением интенсивности турбулентности, при этом в области сильных искажений ($r_0 = 0,006$ – $0,012$) более высокие значения J наблюдались для систем с большим числом каналов (из сравнения кривых 1 и 3 на рис. 4).

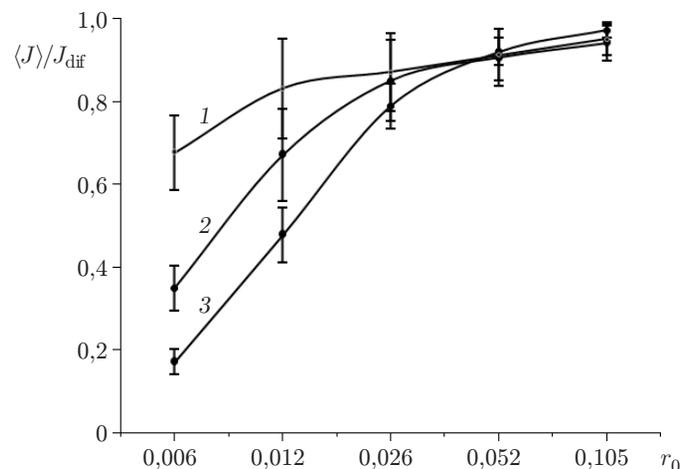


Рис. 4. Зависимость усреднённых по 100 реализациям значений критерия фокусировки от радиуса Фрида для системы с 9 (кривая 3), 81 (2) и 201 (1) каналом

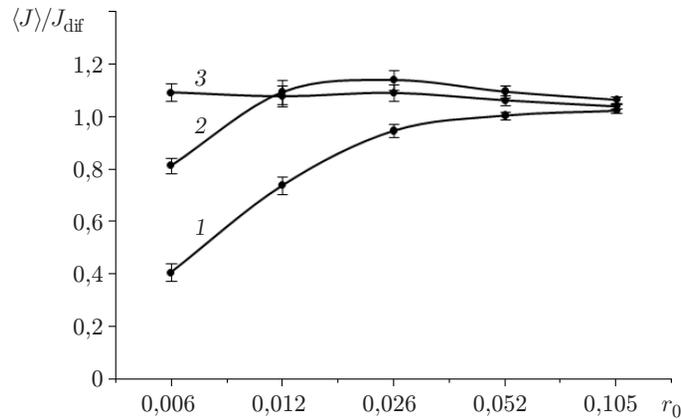


Рис. 5. Компенсация атмосферной турбулентности с использованием метода фазового сопряжения. Усреднённые по 100 реализациям значения критерия фокусировки регистрировались в системах с 9 (кривая 1), 81 (2) и 201 (3) каналом

В работах [8, 9] управление пучком в многоканальной системе осуществлялось с привлечением алгоритма апертурного зондирования, т. е. на основе процедуры градиентного поиска экстремума целевой функции управления, в качестве которой был выбран критерий фокусировки (1). Сравнение алгоритмов показало, что в апертурном зондировании число вызовов целевой функции резко возрастает при увеличении числа каналов, т. е. быстродействие системы падает, тогда как быстродействие фазового сопряжения мало зависит от увеличения числа элементарных пучков. Достаточно полное сравнение указанных алгоритмов для систем с различным числом степеней свободы проведено в [7], где в качестве активного элемента рассматривалось зеркало с варьируемым числом актюаторов, также отмечалось резкое уменьшение быстродействия апертурного зондирования с ростом числа степеней свободы системы. Очевидно, повышение быстродействия возможно ожидать при использовании для управления процедурой стохастического параллельного градиентного спуска [10], но результаты подобных исследований выходят за рамки данной работы.

При фазовом сопряжении, результаты применения которого приведены далее, опорным сигналом являлся гауссовский пучок с радиусом, равным начальному радиусу многоканального излучения. В плоскости излучающей апертуры вариации фазы вносились корректором без учёта ограничений, характерных для реального исполнительного элемента (оценки влияния зеркала, моделируемого упругой пластинкой или набором полиномов Цернике, здесь не приводятся). Эффективность применения фазового сопряжения иллюстрирует рис. 5.

Все кривые, полученные в результате адаптивного управления, располагаются выше, чем соответствующие графики для системы без управления. Причём для системы с 201 каналом в рассмотренном диапазоне изменений радиуса Фрида зависимость критерия фокусировки J , нормированного на дифракционно ограниченное значение J_{dif} , от r_0 отсутствует полностью, а для 9 каналов в области сильных искажений ($r_0 = 0,006$) значения критерия являются в 2 раза более высокими (сравнение кривых 1 на рис. 4 и 5).

Заключение. В неискажающей среде многоканальная система обеспечивает бóльшую концентрацию (на 20–50 %) излучения на объекте в сравнении с гауссовским пучком равного радиуса. Зависимость значений критерия фокусировки от длины трассы имеет характерный максимум, высота которого определяется плотностью заполнения апертуры генератора элементарными пучками и числом каналов системы. Влияние турбулентных флуктуаций показателя преломления уменьшается с увеличением числа каналов. В результате адаптивного управления, реализованного на основе алгоритма фазового сопряжения,

в области сильных искажений значения критерия фокусировки для систем с 9 и 81 каналом могут быть увеличены более чем в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fan T. Y.** Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE Journ. Sel. Top. Quant. Electron. 2005. **11**, N 3. P. 567–572.
2. **Bruesselbach H., Wang S., Minden M. et al.** Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere // JOSA B. 2005. **22**, N 2. P. 347–354.
3. **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. **34**, N 22. P. 3574–3576.
4. **Распространение** лазерного пучка в атмосфере /Под ред. Д. Стробена. М.: Мир, 1981. 414 с.
5. **Марчук Г. И.** Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.
6. **Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И.** Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
7. **Канев Ф. Ю., Лукин В. П.** Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 250 с.
8. **Антипов О. Л., Канев Ф. Ю., Цыро Е. И., Куксенюк Д. С.** Адаптивная коррекция искажений, возникающих в многоканальной оптической системе // Оптика атмосферы и океана. 2012. **25**, № 9. С. 801–809.
9. **Канев Ф. Ю., Цыро Е. И., Макенова Н. А. и др.** Распространение в атмосфере излучения, генерируемого многоканальной лазерной системой с когерентным сложением. Ч. 2. Влияние искажений и их компенсация // Изв. ТПУ. 2012. **321**, № 2. С. 76–80.
10. **Vorontsov M. A., Carhart G. W., Cohen M., Cauwenberghs G.** Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration // JOSA A. 2000. **17**, N 8. P. 1440–1453.

Поступила в редакцию 9 февраля 2015 г.
