

УДК 535.21

РАСПРОСТРАНЕНИЕ В АТМОСФЕРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМОЙ С КОГЕРЕНТНЫМ СЛОЖЕНИЕМ.

Ч. 1. УСЛОВИЯ СВОБОДНОЙ ДИФРАКЦИИ

Ф.Ю. Канев^{1,2}, Е.И. Цыро¹, Н.А. Макенова^{1,2}, Д.С. Куксенко³, О.Л. Антипов⁴¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск
E-mail: mna@iao.ru²Томский политехнический университет³Томский государственный университет⁴Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Проведен анализ современных исследований многоканальных лазерных систем с когерентным сложением излучения, перечислены искажающие факторы, приведено описание методов их активной и пассивной компенсации. Представлены результаты моделирования распространения пучков сложного профиля в условиях свободной дифракции. Рассмотрено влияние на эффективность передачи энергии числа и геометрии расположения излучающих апертур.

Ключевые слова:

Многоканальная оптическая система, источники aberrаций, адаптивное управление лазерным пучком, алгоритм апертурного зондирования.

Key words:

Multichannel optical system, aberration sources, adaptive control over laser beam, multidither algorithm.

Экспериментальные и теоретические исследования многоканальных лазерных систем

Для создания мощных лазеров в последние годы широко используются многоканальные системы лазерных усилителей с когерентным сложением излучения [1, 2]. В таких системах в каждом из усиливающих каналов устанавливаются устройства, предназначенные для управления фазовым сдвигом оптических пучков. Для управления фазой используются электрооптические ячейки [1], нелинейно-оптические элементы [2], пьезооптические устройства или другие элементы [3]. Исследуются также многоканальные системы с фазировкой излучения каждого из каналов за счёт нелинейно-оптического неуправляемого взаимодействия пучков (в частности, использование оптических волокон с несколькими активными сердцевинами) [4–6]. Многоканальная схема лазерного генератора с управлением фазой в каждом из каналов изображена на рис. 1.

Интерес исследователей к развитию многоканальных оптических систем с когерентным сложением обусловлен, прежде всего, возможностью получения генерации с высокой мощностью (как в среднем по времени, так и в импульсах) и пучков высокого качества. Действительно, при когерентном сложении мощность пучка излучения нарастает пропорционально числу каналов N , а приосевая интенсивность пучка растёт пропорционально N^2 . Ещё одним достоинством управления фазой в лазерных каналах является возможность адаптивно компенсировать атмосферные искажения оптического излучения в том случае, когда критерий управления фазой определяется мощностью пучка на удалённой мишени.

Многоканальные системы не свободны от недостатков, в частности, проблематичной является синхронизация каналов, осуществляемая с целью получения когерентного выходного излучения. В качестве примеров здесь можно привести экспериментальные работы [6] и [9], в которых пассивная синхронизация выполнена за счёт введения оптической связи между каналами. Авторами [6] для генерации использовались три независимых источника, имеющих длины волн 1550,06, 1550,17 и 1550,23 нм. В результате взаимодействия пучков на выходе получено когерентное излучение с длиной волны 1550,19 нм.

Аналогичное изменение частоты при замыкании связи между каналами (экспериментальная установка включала два независимых лазера) отмечено авторами работы [9]: наблюдалась генерация излучения мощностью 50 Вт, максимальной для многоканальной системы на время публикации статьи.

Получение одномодового излучения также достигается при управлении параметрами системы (активная синхронизация). Так в [10] сообщается о когерентном сложении сигналов двух оптоволоконных лазерных источников. Для этого в качестве выходного зеркала резонаторов использовались решетки Брегга, имеющие резонансные частоты 1536,08 и 1535,80 нм. Резонансная частота одной из решеток регулировалась ее нагревом. В результате было зафиксировано когерентное сложение, при котором выходное излучение имело определенную частоту 1535,80 нм.

Как видно из представленного материала, эксперименты обычно проводятся с системами, включающими 2–3 канала (в [4] была рассмотрена си-

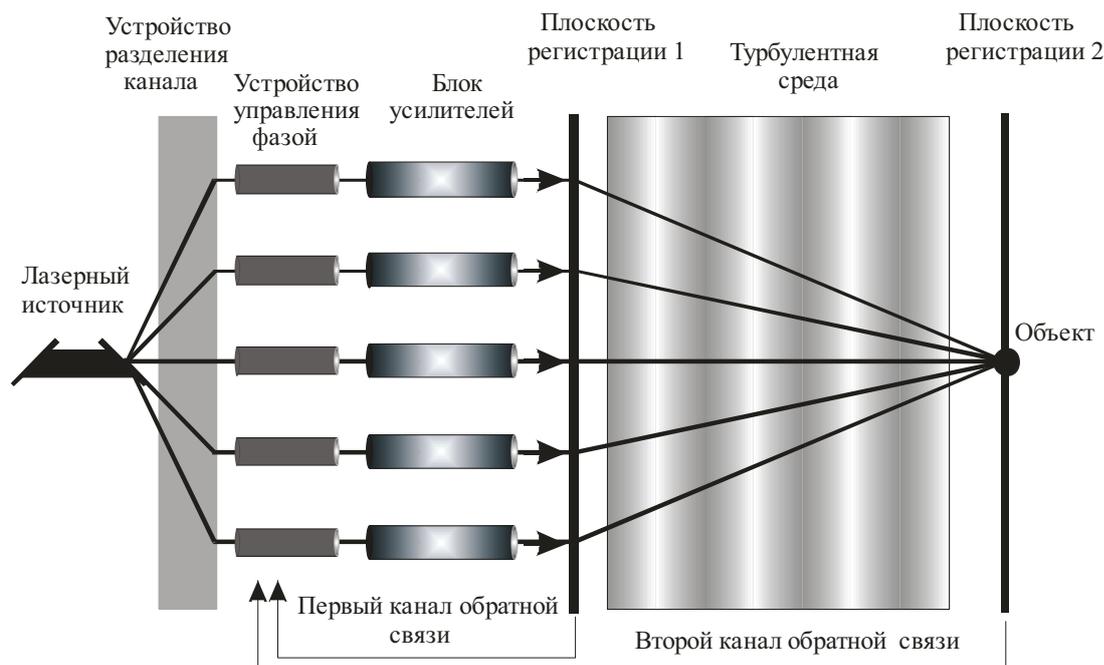


Рис. 1. Схематическое изображение многоканальной оптической системы, включающей контур адаптивного управления излучением

стема с 7 каналами), тогда как снижение плотности мощности источника и увеличение диаметра выходной апертуры без уменьшения плотности ее заполнения достигается только при увеличении числа элементарных пучков. Целесообразным является увеличение числа субапертур и, с точки зрения энергетики системы, при условии, что сложение является когерентным (при когерентном сложении интенсивность на оси увеличивается как N^2 , при некогерентном – как N , где N – число субапертур). Нужно отметить, что увеличение каналов без потери когерентности связано не только с очевидными практическими сложностями, но имеет и принципиальные ограничения. Авторами [11] на основе теоретического и численного анализа было показано, что с увеличением числа каналов системы от 4 до 50 эффективность когерентного сложения элементарных пучков уменьшается приблизительно в 5 раз, т. е. качество излучения уменьшается.

Кроме проблем, связанных с синхронизацией мод, потеря качества излучения может быть обусловлена и другими факторами. Так неравномерность температуры системы (наличие температурных градиентов), акустические шумы, вибрации и другие причины приводят к появлению случайных фазовых набегов в каналах и, как следствие, к деградации светового поля на объекте фокусировки [4, 13].

Как в любой относительно новой и развивающейся области науки, в рассматриваемом разделе большое количество результатов получено на основе методов численного эксперимента [7, 8, 11]. По-видимому, наиболее полный теоретический анализ распространения излучения в среде без искажений

и в турбулентной атмосфере приводится в статьях [7, 8], где авторами показано, что в условиях свободной дифракции 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 выделенной апертуры), как гауссовский пучок с диаметром, равным диаметру всей области, занимаемой элементарными апертурами.

Во второй части исследования [8] было рассмотрено распространение излучения в турбулентной среде. Искажения задавались одним фазовым экраном, расположенным в плоскости передающей апертуры. Управление пучком осуществлялось на основе алгоритма фазового сопряжения. Авторами указаны сложности технической реализации алгоритма. Фактически, сопряжение нужно выполнять в каждом из каналов, т. е. должна быть построена так называемая «распределенная адаптивная система», или, другими словами, N адаптивных систем (отдельная для каждой из N ветвей). При отсутствии ограничений на воспроизводимый волновой фронт и ошибок при регистрации фазы опорного излучения единственный фазовый экран может быть скомпенсирован полностью, независимо от интенсивности задаваемых им искажений [12]. Поэтому и в статье М.А. Воронцовым и С.И. Лачиновой [12] демонстрировалась высокая эффективность коррекции. Но кроме практической возможности создания системы открытым остается вопрос о компенсации протяженного слоя.

Кроме теоретического изучения возможности коррекции искажений в многоканальной системе, активно ведутся экспериментальные исследования

данной проблемы, прежде всего интерес привлекает уменьшения влияния aberrаций в самой установке. Возможным здесь является применение пассивных методов – демпфирование механических колебаний и снижение акустических шумов. Когда данные методы исчерпываются, в систему вводится обратная связь и активное управление относительными фазовыми сдвигами в каналах [4].

Естественное продолжение исследований в данной области – это попытка коррекции искажающего влияния атмосферы. Один из последних экспериментов в данной области был проведен при участии М.А. Воронцова [13]. Коллективом исследователей изучалась компенсация искажений, возникающих в оптической мультипучковой системе и вносимых турбулентностью на атмосферной трассе длиной 7 км, проложенной между двумя зданиями. Система включала семь каналов. В работе было отмечено, что эффективность системы зависит от ее быстродействия и от используемого алгоритма управления (в обоих случаях применялись модификации апертурного зондирования).

Приведенный анализ литературных источников показывает, что при дальнейшем исследовании многоканальных лазерных систем могут быть поставлены следующие цели:

1. Численное исследование систем с малым (от 2 до 10) числом каналов.
2. Исследование распространения пучков генерируемых источниками с различной геометрией расположения оптических волокон.
3. Модельные исследования распространения пучков в протяженном слое искажающей среды.

Результаты численных экспериментов, выполненных для достижения поставленных целей, приведены в настоящей статье.

Численная модель многоканальной системы.

Используемый алгоритм управления

Исследование многоканальной системы было выполнено на основе методов численного эксперимента. В построенной для этого модели распространение пучков описывалось уравнением квазиоптики [14], решение которого проводилось с использованием быстрого преобразования Фурье [15]. Турбулентные искажения задавались набором фазовых экранов, равномерно распределенных на трассе распространения и разделенных участками свободной дифракции (метод расщепления

по физическим факторам [16]). Длина трассы нормировалась на дифракционную длину излучения (по всему тексту этот параметр является безразмерным), поперечные координаты – на начальный радиус элементарного пучка.

Распределение светового поля на излучающей апертуре многоканального лазерного источника при различном числе и относительном расположении оптических волокон представлено на рис. 2.

Для характеристики поля в плоскости наблюдения использовался критерий фокусировки [14]:

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

где $J(t)$ пропорционален мощности излучения, попадающей в пределы апертуры с диаметром, равным диаметру элементарного пучка. Так как критерий нормирован на полную мощность P , генерируемую лазерным источником, он является безразмерной величиной. В формулу также входят функция пропускания апертуры приемника

$$\rho(x, y) = \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{S^2}\right]$$

и распределение интенсивности излучения в плоскости регистрации $I(x, y, t)$; x и y – текущие координаты; S – площадь апертуры приемника.

Коррекция случайных искажений была реализована с использованием алгоритма апертурного зондирования [17]. Данный итерационный алгоритм основан на градиентном методе поиска экстремума целевой функции управления и может быть записан в виде:

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{F}_{n-1} + \alpha_n \cdot \text{grad}(J_n).$$

Здесь n – номер итерационного шага; α – коэффициент, величина которого изменяется в процессе управления; \mathbf{F} – вектор координат управления (в нашем случае это набор фазовых сдвигов в каждом из каналов). В качестве целевой функции в решаемой задаче использовался критерий фокусировки.

Распространение излучения в условиях свободной дифракции

Исследуется распространение пучка, генерируемого оптоволоконным лазером, в условиях свободной дифракции и проводится сравнение эффективности передачи энергии с использованием выбранной оптической системы и с помощью обычного гауссовского излучения.



Рис. 2. Геометрия расположения оптических волокон на излучающей апертуре лазерной системы включающей 2 (а), 4 (б), 8 (в) и 9 (г) каналов



Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения для системы, включающей 4 (а, б) и 8 (в, г) каналов. Расстояние между центрами $d=1,5$ для всех рисунков. Длина трассы $Z=1,5$ (а, в) и $Z=3$ (б, г) нормирована на дифракционную длину излучения

Распространение пучков сложного амплитудно-го профиля в условиях свободной дифракции иллюстрируется на рис. 3, где показано распределение светового поля для систем, включающих 4 и 8 каналов в двух сечениях трассы. Можно видеть, что, несмотря на значительное отличие параметров излучения, для обоих вариантов характерным является наличие центрального максимума дифракционной картины, т. е. можно предполагать, что с использо-

ванием рассматриваемой системы реализуется эффективная передача энергии в заданную область.

Зависимость критерия фокусировки J от длины трассы, полученная при различном числе и геометрии расположения оптических волокон и расстояний между центрами элементарных пучков d , представлена на рис. 4. Здесь же приводится подобная зависимость (кривая 1), регистрируемая для гауссовского пучка.

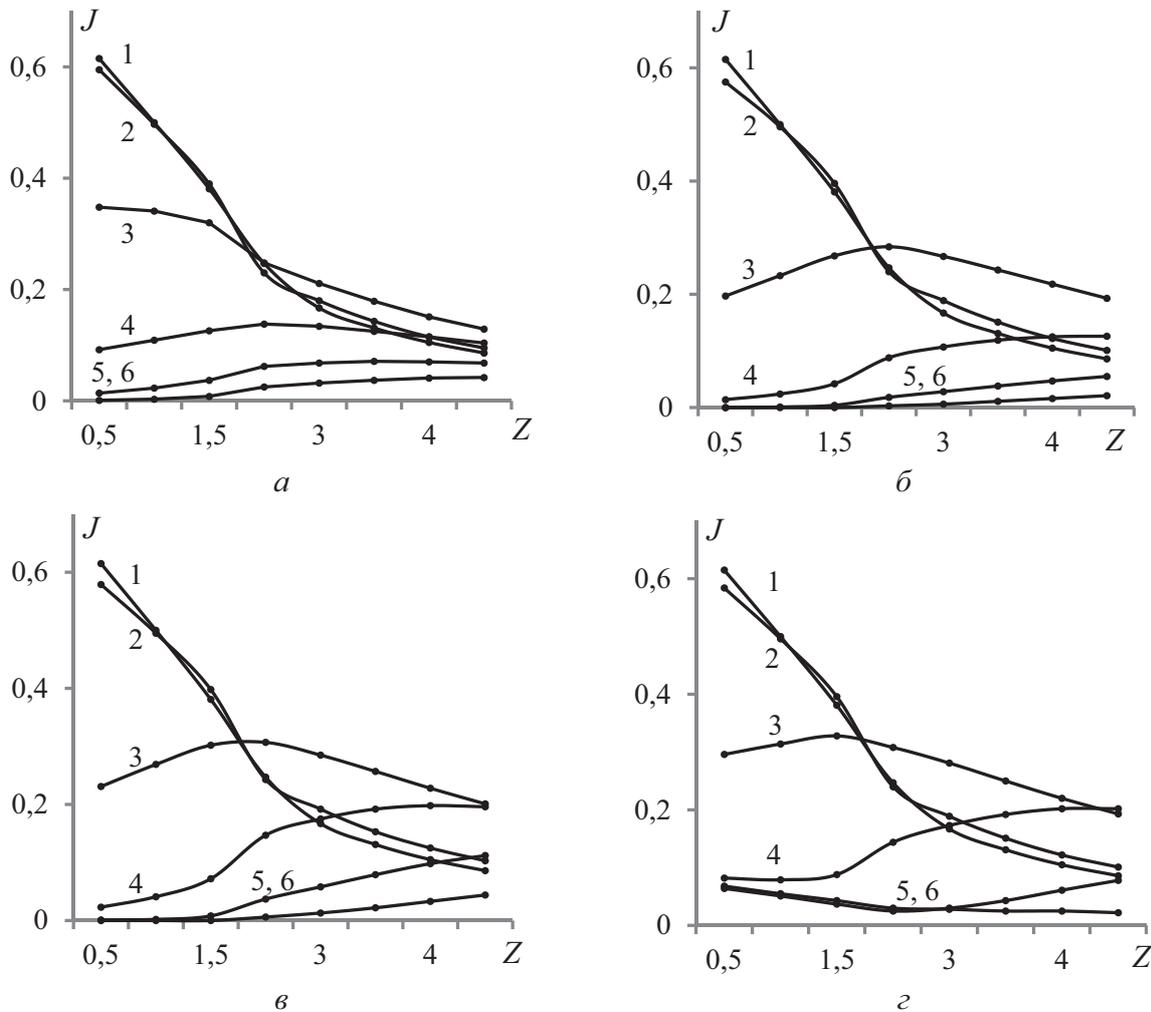


Рис. 4. Изменение критерия фокусировки J при изменении длины трассы распространения, регистрируемое в многоканальной оптической системе, включающей два (а), четыре (б), восемь (в) и девять (г) каналов излучения. Данные получены для гауссовского пучка (кривая 1) и для пучка сложной формы при расстоянии между центрами элементарных пучков равными 0,5 диаметра (кривая 2); 1,5 (3); 2,5 (4); 3,5 (5); 4,5 (6) диаметров

При анализе данных отметим вначале особенности, являющиеся общими для всех случаев. *Во-первых*, при малом расстоянии между центрами элементарных пучков ($d=1,5$) кривые для гауссовского и сложного пучка практически неотличимы (1 и 2 на графиках). *Во-вторых*, при $d=3,5$ и $d=4,5$ кривые 5 и 6 проходят ниже, чем график для гауссовского пучка вне зависимости от длины трассы распространения. Таким образом, с точки зрения передачи энергии при малом ($d \leq 0,5$) или слишком большом ($d=3,5$) расстоянии между центрами субапертур использование многоканальной системы является нецелесообразным.

В тоже время из рис. 4 видно, что при оптимальном выборе расстояния между центрами ($d=1,5$ и $2,5$) мультипучковая система обеспечивает более высокие значения критерия фокусировки, чем гауссовское излучение (кривая 3, на некоторых графиках – 4), но только на трассах больших, чем $2,5 \dots 3$ дифракционных длины. Так для системы, сформированной 9 волокнами, при $Z=4$ (рис. 2, *г*) относительное значение энергии в апертуре для

многоканальной системы равно 0,3, а для обычного излучения 0,09, т. е. использование оптоволоконного лазера позволяет более чем в три раза увеличить эффективность передачи энергии. При другом числе каналов это увеличение менее выражено, и наименьшим оно является при использовании для генерации двух оптических волокон (рис. 4, *а*).

Выводы

Показано, что снижение эффективности передачи энергии многоканальной оптической системой в атмосфере обусловлено шумами, возникающими в лазерном генераторе и оптическом волокне, а также атмосферной турбулентностью.

Численными исследованиями распространения лазерного излучения в неискажающей среде установлено, что использование оптоволоконного лазера целесообразно только на относительно длинных трассах (свыше $2,5$ дифракционной длины излучения). Оптимальное расстояние между центрами субапертур составляет $1,5 \dots 2,5$ начальных диаметра элементарного пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fan T.Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2005. – V. 11. – № 3. – P. 567–572.
2. Bruesselbach H., Shuoqin Wang, 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. – № 2. – P. 347–354.
3. Bellanger C., Brignon A., Colineau J., Huignard J.P. Coherent fiber combining by digital holography // Opt. Lett. – 2008. – V. 33. – № 24. – P. 2937–2939.
4. Xinyan Fan, Jingjiao Liu, Jinsheng Liu, Jingli Wu. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array // Chinese Optics Letters. – 2010. – V. 8. – № 1. – P. 48–51.
5. Gopinath J.T., Chann B., Fan T.Y., Sanchez-Rubio A. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array // Optics Express. – 2008. – V. 16. – № 13. – P. 9405–9409.
6. Bing Lei, Ying Feng. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop // Optics Express. – 2007. – V. 15. – № 25. – P. 17114–17119.
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. – № 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. – № 8. – P. 1960–1973.
9. Wang B., Mies E., Minden M., Sanchez A. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array // Optics Letters. – 2009. – V. 34. – № 7. – P. 863–865.
10. Kozlov V.A., Hernandez-Cordero J., Morse T.F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers // Opt. Lett. – 1999. – V. 24. – № 24. – P. 1814–1816.
11. Jianqiu Cao, Jing Hou, Qisheng Lu, Xiaojun Xu. Numerical research on self-organized coherent fiber laser arrays with circulating field theory // J. Opt. Soc. Amer. B. – 2008. – V. 25. – № 7. – P. 1187–1192.
12. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. – 249 с.
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. – № 22. – P. 4455–4457.
14. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П., Сухорукоев А.П., Чесноков С.С. Тепловое самовоздействие световых пучков и методы его компенсации // Известия вузов. Сер. Радиофизика. – 1980. – Т. 23. – № 1. – С. 1–22.
15. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics of Computation. – 1965. – V. 19. – № 90. – P. 297–301.
16. Марчук Г.И. Методы расщепления. – М.: Наука, 1988. – 264 с.
17. Воронцов М.А., Чесноков С.С. Метод численного исследования адаптивных оптических систем апертурного зондирования // Известия вузов. Сер. Радиофизика. – 1982. – Т. 25. – № 11. – С. 1310–1316.

Поступила 05.03.2012 г.