

УДК 535.211

## Адаптивная коррекция искажений, возникающих в многоканальной оптической системе

О.Л. Антипов<sup>1</sup>, Ф.Ю. Канев<sup>2,3</sup>, Е.И. Цыро<sup>2</sup>, Д.С. Куксенюк<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород  
603600, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. И.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 2.03.2012 г.

Проведен анализ результатов современных исследований многоканальных лазерных систем, перечислены искажающие факторы, описаны методы их активной и пассивной компенсации. Также представлены результаты моделирования распространения пучков сложного профиля, рассмотрена возможность передачи энергии на расстояние в системах данного типа. Изучено влияние случайных фазовых набегов и атмосферной турбулентности на параметры светового поля в плоскости фокусировки. Рассмотрена возможность использования алгоритма апертурного зондирования для коррекции случайных фазовых искажений, возникающих в многоканальной системе.

**Ключевые слова:** многоканальная оптическая система, источники aberrаций, адаптивное управление лазерным пучком, апертурное зондирование; multichannel optical system, aberration sources, adaptive control over laser beam, multidither algorithm.

### Экспериментальные и теоретические исследования многоканальных лазерных систем

Для передачи энергии излучением авторами современных исследований по оптике лазеров предлагается использовать многоканальные оптические системы вместо традиционных когерентных источников [1–6]. В данных системах излучение перед выходом в атмосферу разделяется на несколько каналов, в каждом из которых находятся усилители, а в некоторых случаях и устройства, предназначенные для управления относительным фазовым сдвигом [6, 7]. Так, в экспериментальной работе [6] в качестве фазовых модуляторов в оптический тракт были введены оптические волокна, легированные ионами иттербия, которые под воздействием излучения накачки обеспечивают появление фазового сдвига в каналах. Схематически многоканальная система с разделением излучения одного лазерного генератора изображена на рис. 1.

Также разрабатываются многоканальные системы второго типа, в которых осуществляется синхро-

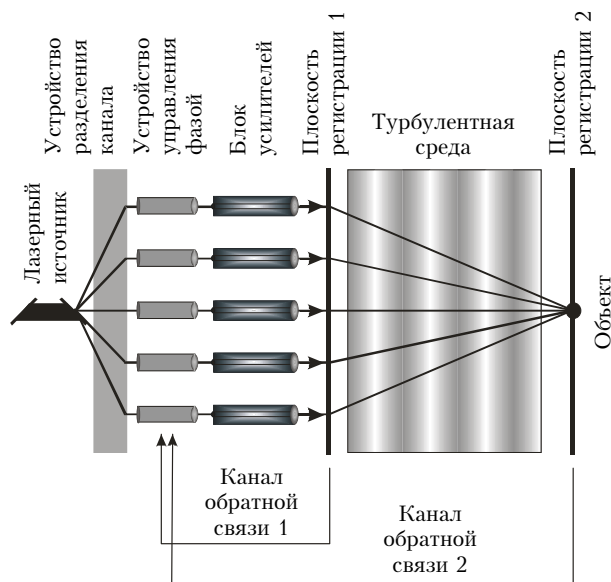


Рис. 1. Схематическое изображение многоканальной оптической системы, включающей контур адаптивного управления излучением

низация излучения нескольких генераторов с целью получения когерентного сигнала [8, 9].

Интерес исследователей к развитию многоканальных оптических систем обусловлен следующими причинами:

\* Олег Леонидович Антипов (antipov@appl.sci-nnov.ru); Федор Юрьевич Канев (mna@iao.ru); Екатерина Ивановна Цыро (moiseye@sibmail.com); Дмитрий Сергеевич Куксенюк (mna@iao.ru).

1. С использованием мультипучковых систем возможно повышение качества выходного излучения без значительного увеличения стоимости установки [10, 11]. Известно, что увеличение диаметра выходной апертуры приводит к уменьшению расходимости пучка и уменьшению его фокального пятна. В то же время увеличение диаметра ведет к значительному (отнюдь не прямо пропорциональному) увеличению размеров системы, а также к сложности изготовления и большей стоимости. Поэтому целесообразным является формирование широкоапертурных источников за счет комбинации нескольких пучков малого диаметра.

2. В стандартном одномодовом лазере максимальная передаваемая мощность ограничена нелинейными эффектами, возникающими в активной среде генератора и в атмосфере. При когерентном сложении пучков плотность мощности и искажения световой волны уменьшаются, за счет чего повышается качество излучения на объекте фокусировки [6].

К сожалению, 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 [9, 12], в которых пассивная синхронизация выполнена за счет введения оптической связи между каналами. Авторами [9] 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) наблюдалось авторами работы [12], особенностью которой являлась 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 [13] 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. Частота одной из решеток регулировалась термически. В результате было зафиксировано когерентное сложение, при котором выходное излучение имело определенную частоту.

Как видно из представленного обзора статей, эксперименты обычно проводятся с системами, включающими 2–3 канала (в [7] была рассмотрена система с 7 каналами), тогда как снижение плотности мощности источника и увеличение диаметра выходной апертуры без уменьшения плотности ее заполнения достигаются 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 практически сложностями, но имеет и принципиальные ограничения. Авторами [14] 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 [6, 15, 16].

Как в любой относительно новой и развивающейся области науки, в рассматриваемом разделе большое количество результатов получено на основе методов численного эксперимента [10, 11, 14–16]. По-видимому, наиболее полный теоретический анализ распространения излучения в среде без искажений и в турбулентной атмосфере приводится в статьях [10, 11]. В них показано, что в условиях свободной дифракции плотной упаковки массива излучателей и достаточно большом их количестве (от 19 до 37) многоканальная система обеспечивает приблизительно такие же характеристики поля (оценивались пиковая интенсивность и мощность, попадающая в пределы выделенной апертуры), как гауссовский пучок диаметром, равным диаметру всей области, занимаемой элементарными апертурами.

Во второй части исследования рассмотрено распространение излучения в турбулентной среде [11]. 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 [17]. Поэтому в [17] демонстрировалась высокая эффективность коррекции. Но помимо практической возможности создания системы открытым здесь 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 уменьшение влияния аберраций в самой установке. Возможным здесь является применение пассивных методов — демпфирование механических колебаний и снижение акустических шумов. Когда данные методы исчер-

пываются, в систему вводятся обратная связь и активное управление относительными фазовыми сдвигами в каналах. Так, экспериментальная реализация адаптивного управления за счет регулирования мощности накачки описана в [6] для системы, включающей два канала, и в [7] для 7 каналов.

Естественное продолжение экспериментов в данной области — это попытка коррекции искажающего влияния атмосферы. Первые эксперименты были проведены в лабораторных условиях [18], когда турбулентные вариации показателя преломления создавались мощным вентилятором, а полная длина трассы составляла 10 м. Для управления пучком использовался алгоритм стохастического параллельного спуска [19], результатом его применения являлось увеличение контраста интерференционной картины.

Один из последних известных экспериментов в данной области снова был проведен при участии М.А. Воронцова [20]. Коллективом исследователей изучалась компенсация искажений, возникающих в оптической мультипучковой системе и вносимых турбулентностью на атмосферной трассе 7 км, проложенной между двумя зданиями. Система включала 7 каналов. Было отмечено, что эффективность системы зависит от ее быстродействия и от используемого алгоритма управления (в обоих случаях применялись модификации апертурного зондирования).

Проведенный нами анализ литературных источников показывает, что в настоящее время ведется интенсивное теоретическое и экспериментальное исследование многоканальных оптических систем, продолжение которого является целесообразным в следующих направлениях:

1. Численное исследование систем с малым (от 2 до 10) числом каналов (именно для таких систем получены экспериментальные результаты).
2. Исследование распространения пучков, генерируемых источниками различных конфигураций.
3. Модельные исследования распространения пучков в протяженном слое искажающей среды.

### Численная модель многоканальной системы, используемый алгоритм управления

Исследование многоканальной системы, результаты которого приведены в настоящей статье, было выполнено на основе методов численного эксперимента. В построенной для этого модели распространение пучков описывалось уравнением квазиоптики [22], продольные координаты нормировались на дифракционную длину, поперечные координаты и расстояние между центрами оптических волокон  $d$  — на начальный радиус пучка.

Распределение светового поля на выходной апертуре источника при различном числе оптических каналов представлено на рис. 2.

Для характеристики поля в плоскости наблюдения использовался критерий фокусировки [22]:

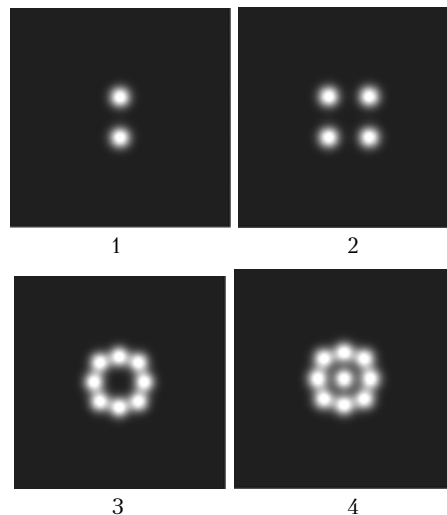


Рис. 2. Поле на выходе многоканального лазерного источника. Цифрами обозначены конфигурации расположения оптических волокон

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

пропорциональный мощности излучения, попадающего в пределы апертуры диаметром, равным диаметру элементарного пучка.

Коррекция случайных искажений была реализована с использованием алгоритма апертурного зондирования [21]. Данный итерационный алгоритм основан на градиентном методе поиска экстремума целевой функции управления и может быть записан в виде

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

где  $n$  — номер итерационного шага;  $\alpha$  — коэффициент, величина которого изменяется в процессе управления;  $\mathbf{F}$  — вектор координат управления. В качестве целевой функции в решаемой задаче использовался критерий фокусировки.

### Распространение излучения в условиях свободной дифракции

Рассмотрим распространение пучка, генерируемого оптоволоконным лазером, в условиях свободной дифракции и проведем сравнение эффективности передачи энергии с использованием выбранной оптической системы и с помощью обычного гауссовского излучения. Во всех численных экспериментах мощность на выходе гауссовского источника была равна суммарной мощности излучения, генерируемого многоканальной системой.

Распространение пучков сложного амплитудного профиля в условиях свободной дифракции иллюстрируется на рис. 3, где показано распределение светового поля для конфигурации 2 и 4 в двух сечениях трассы.

Видно, что, несмотря на значительное отличие параметров излучения, для обоих вариантов характерным является наличие центрального максимума

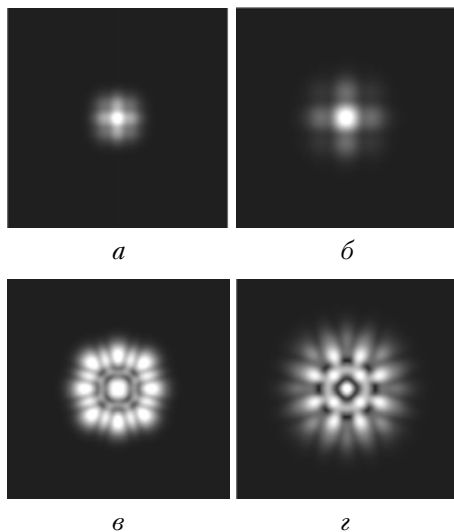


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения для конфигураций 2 (*a*, *б*) и 4 (*в*, *г*). Расстояние между центрами элементарных пучков  $d = 1,5$ ; длина трассы  $Z = 1,5$  (*a*, *в*) и 3 (*б*, *г*) дифракционной длины излучения

дифракционной картины, т.е. можно предполагать, что с использованием рассматриваемой системы реализуется эффективная передача энергии в заданную область. Аналогичные результаты наблюдаются и для конфигураций 1 и 3.

Зависимость критерия фокусировки  $J$  от длины трассы, полученная для различных конфигураций и расстояний между центрами элементарных пучков  $d$ , представлена на рис. 4. Здесь же приводится подобная зависимость (кривая 1), регистрируемая для гауссовского пучка.

При анализе данных отметим вначале особенности, являющиеся общими для всех конфигураций. Во-первых, при малом расстоянии между центрами элементарных пучков ( $d = 0,5$ ) кривые для гауссовского и сложного пучков практически неотличимы (1 и 2). Во-вторых, при  $d = 3,5$  и  $4,5$  соответствующие кривые 5 и 6 проходят ниже, чем график для гауссовского пучка вне зависимости от длины трассы распространения. Таким образом, с точки зрения передачи энергии оптимальное расстояние между центрами субапертур составляет от 1,5 до 3 начальных диаметров элементарного пучка, при других расстояниях использование многоканальной системы является нецелесообразным.

В то же время 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 больше 2,5–3 дифракционных длин. Так, при  $Z = 4$  и конфигурации 4 (см. рис. 2) 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 3 раза увеличить эффективность передачи энергии. Для других конфигураций пучков это

увеличение менее выражено, и наименьшим оно является для конфигурации 1 (рис. 4, *a*).

## Влияние на эффективность передачи энергии случайных фазовых набегов, возникающих в каналах оптической системы

Авторами экспериментальных работ [6, 7] было отмечено, что одним из факторов, снижающих эффективность передачи энергии в многоканальной лазерной системе, являются случайные фазовые набег, возникающие в каждом из каналов. В [7] было указано, что характерная частота таких искажений составляет несколько килогерц и при достаточном быстродействии (компенсация выполнялась на 10 кГц) набег могут быть скомпенсированы. В настоящей статье рассматривается влияние случайных набегов при выбранной конфигурации размещения субапертур и оценивается возможность их компенсации на трассах различной длины.

При моделировании искажений случайные набег были равномерно распределены в определенном интервале, ширина которого изменялась. Таким образом, варьируемыми параметрами задачи являлись число и конфигурация расположения пучков, их размеры, интервал задания случайных искажений, расстояние от генератора до плоскости регистрации.

Проявление данного типа искажений иллюстрируется на рис. 5, где приводятся амплитудные распределения излучения в плоскости наблюдения, полученные для конфигурации 3, т.е. при использовании системы, включающей 8 пучков.

Рис. 5 качественно демонстрирует искажения интерференционной картины и уменьшение энергии, попадающей в центральный максимум при увеличении интервала случайных набегов.

Количественные характеристики процесса передачи энергии приводятся на рис. 6, где критерий фокусировки для конфигураций 2 и 3 представлен в виде функции, зависящей от интервала фазовых вариаций.

Данные были получены на трассах  $Z$ , равных 2,5 и 3,5, т.е. для условий, когда передача энергии с использованием нескольких каналов является наиболее целесообразной.

При  $\Delta\varphi = 0,2\pi$  пучки распространяются в условиях, близких к условиям свободной дифракции, искажения здесь очень малы, соответствующие значения критерия практически совпадают с данными, приводимыми в первом разделе настоящей статьи для идеальных условий. При этом конфигурация 3 обеспечивает результаты на 15–20% выше, чем конфигурация 2. С увеличением интервала вариаций фазовых набегов во всех случаях наблюдается уменьшение значений критерия и для трасс большей длины регистрируются меньшие значения. При максимально возможных для используемой численной модели вариациях фазы  $\Delta\varphi$  (при  $\Delta\varphi = 1,4\pi$ ) на трассе  $Z = 2,5$  критерий равен 0,10 для конфигурации 2

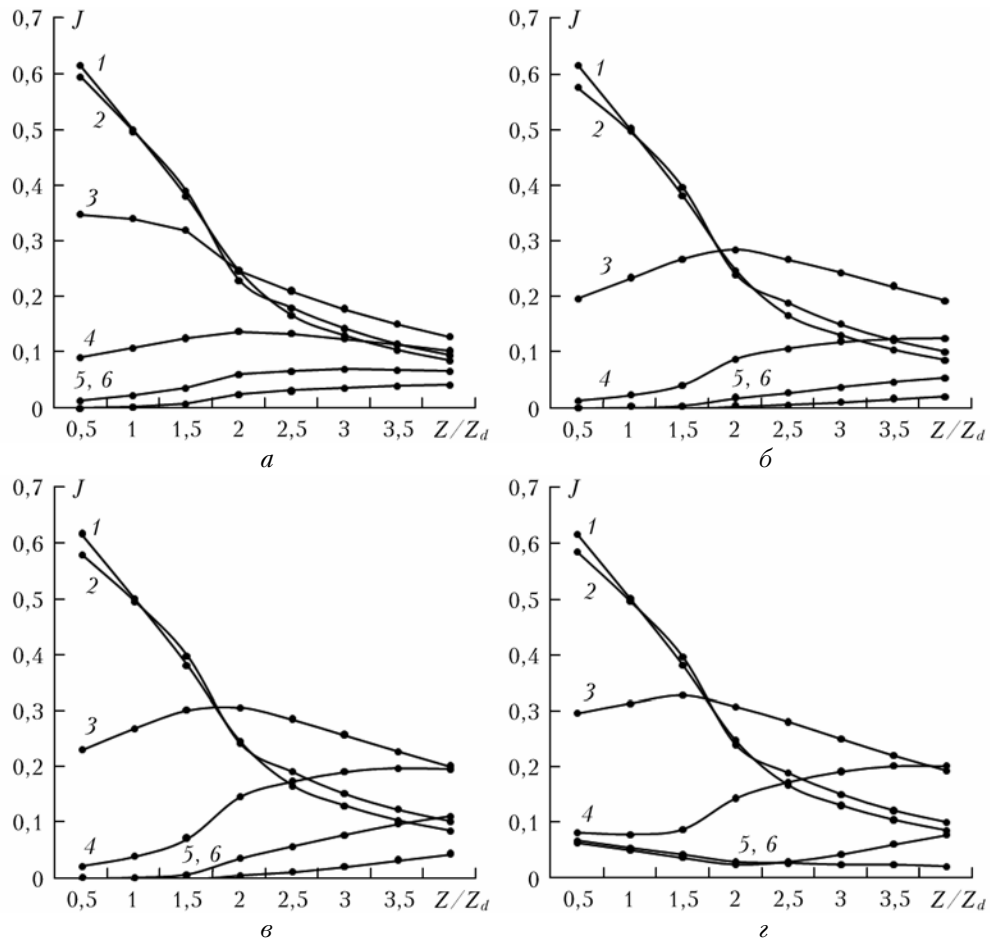


Рис. 4. Изменение критерия фокусировки  $J$  при изменении длины трассы распространения для конфигураций 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г). Данные получены для гауссовского пучка (кривая 1) и для пучка сложной формы при  $d = 0,5$  (кривая 2); 1,5 (3); 2,5 (4); 3,5 (5); 4,5 (6)

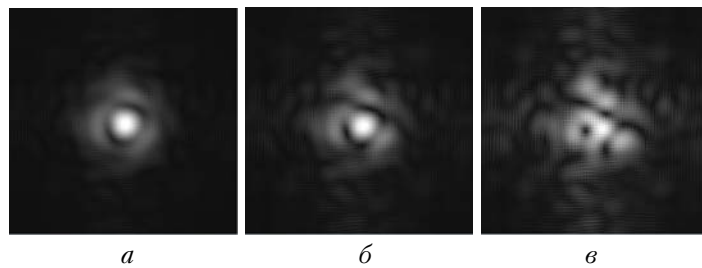


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения, полученной при наличии случайных фазовых набегов в каналах оптической системы для конфигурации 3,  $Z = 2,5$ ,  $d = 2$ , интервал случайных набегов:  $0,4\pi$  (а);  $0,8\pi$  (б);  $1,4\pi$  (в)

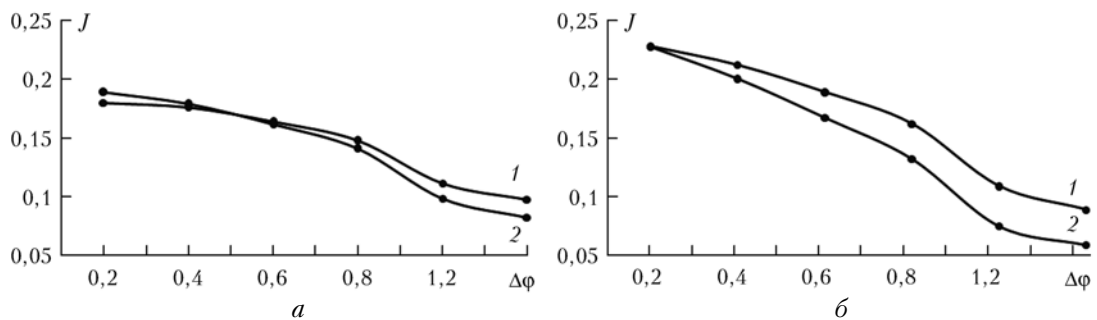


Рис. 6. Зависимость критерия фокусировки  $J$  от случайных фазовых набегов в каналах для конфигураций 2 (а) и 3 (б),  $Z = 2,5$  (кривая 1) и 3,5 (2);  $d = 2$

и 0,09 для 3, при увеличении длины до 3,5 получаем  $J = 0,08$  (конфигурация 2) и 0,06 (3). Таким образом, при значительных фазовых искажениях пучков на более короткой из трасс обе конфигурации обеспечивают практически одинаковую эффективность передачи энергии, для трасс большей длины ( $Z = 3,5$ ) использование конфигурации 3, целесообразное при отсутствии искажений, дает меньшие значения критерия фокусировки.

Анализ распространения пучков при наличии искажений был выполнен и для трасс большей длины. Численные эксперименты проводились для систем, включающих 4 и 8 каналов (конфигурации 2 и 3) (рис. 7).

Видны снижение контраста центрального максимума и уменьшение критерия  $J$  при увеличении интенсивности искажений.

### Распространение излучения при наличии турбулентных искажений

Влияние атмосферной турбулентности на развитие искажений лазерного излучения изучено достаточно хорошо. Проведено множество теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении, выявлены основные закономерности, описаны характерные aberrации пучков, выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных, полученных для плоских и сферических волн [22–24]. В то же время можно ожидать, что при распространении в турбулентной среде мультипучкового излучения проявятся какие-либо новые особенности, нетипичные для гауссовского пучка. Поэтому в данном разделе приводятся результаты численных экспериментов, характеризующие распространение рассматриваемого излучения в атмосфере. Турбулентные искажения моделировались набором из 10 фазовых экранов, равномерно распределенных по трассе.

На рис. 8 приведена зависимость критерия фокусировки  $J$  от интенсивности турбулентности, характеризуемой радиусом Фрида  $r_0$ , полученная для одной из реализаций набора экранов.

Данные соответствуют гауссовскому пучку и многоканальной системе, работающей в конфигурациях 2 и 4. Видно, что практически во всем диапазоне изменений  $r_0$  изучаемая оптическая система обеспечивает более высокие, чем обычный лазерный источник, результаты. Только при очень высокой интенсивности искажений ( $r_0 < 0,04$ ) значения критерия становятся близкими к данным, соответствующим гауссовскому пучку.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что использование мультиканальной системы для передачи энергии является более эффективным в турбулентной среде по сравнению с обычным одномодовым лазером.

Усредненные по 100 реализациям случайных экранов значения критерия, регистрируемые в турбулентной среде, представлены на рис. 9.

Все закономерности, отмеченные при анализе одной из реализаций, остались без изменения. Таким образом, основной вывод справедлив и для усредненных результатов.

### Коррекция случайных фазовых искажений, возникающих в многоканальной лазерной системе

В настоящем разделе рассматривается возможность коррекции искажений, обусловленных случайными фазовыми набегами, возникающими в каналах оптической системы. Управление пучком проводится на основе алгоритма апертурного зондирования, подробное описание которого приведено в предыдущих разделах.

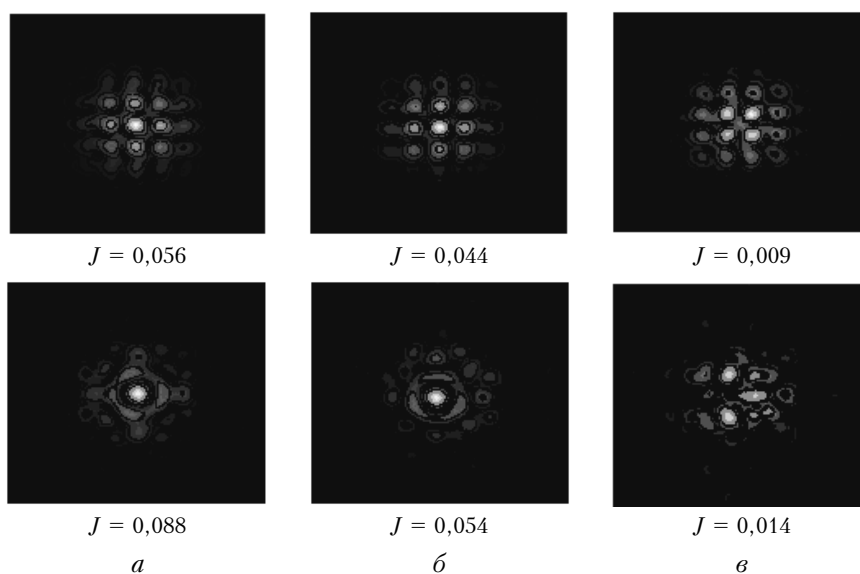


Рис. 7. Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения при случайных фазовых набегах в каналах оптической системы для конфигураций из 4 и 8 пучков,  $Z = 9$ ,  $d = 3$ ,  $\Delta\phi = 0,4\pi$  (а);  $0,8\pi$  (б);  $1,4\pi$  (в)

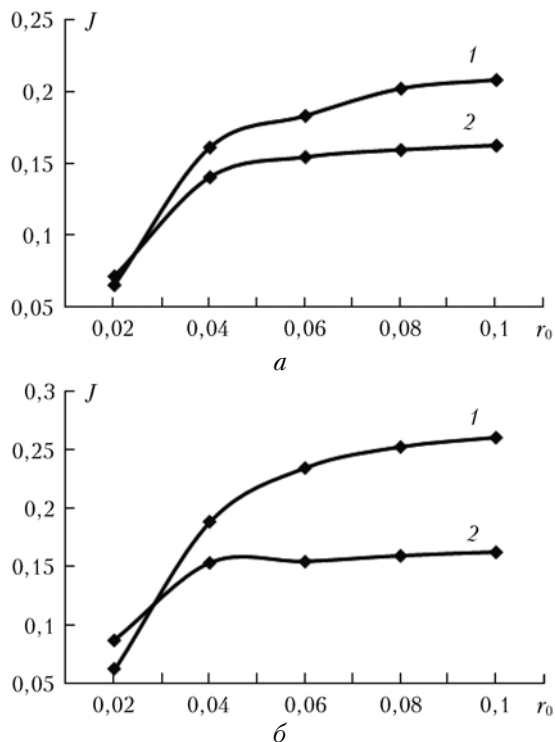


Рис. 8. Зависимость критерия фокусировки от интенсивности турбулентных искажений, полученная для мультicanaльной оптической системы (кривая 1, конфигурация 2 (a) и 4 (б)) и для гауссовского пучка (кривая 2) на одной из реализаций;  $Z = 3,5$ ,  $d = 2$

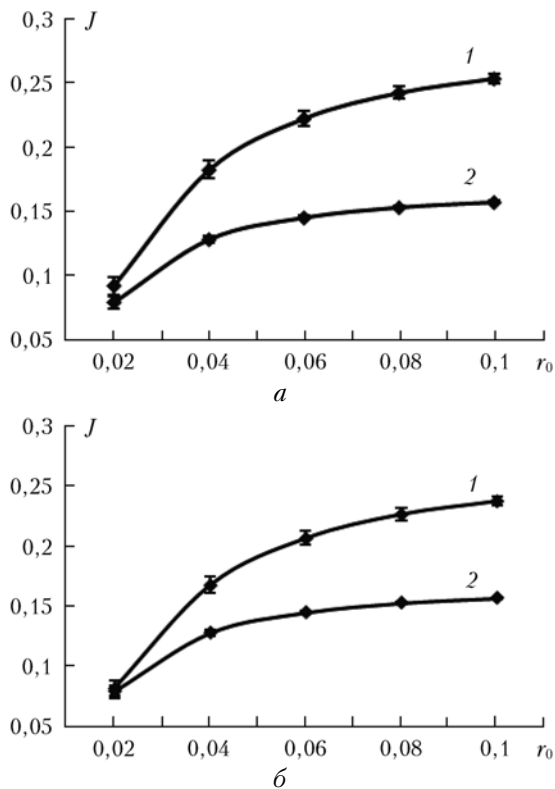


Рис. 9. Параметры численного эксперимента соответствуют рис. 8. Представлены усредненные результаты

Распределение интенсивности светового поля до и после коррекции приведено на рис. 10, где видно, как в искаженном световом поле в результате использования апертурного зондирования формируется центральный, достаточно хорошо выраженный максимум. Следовательно, использование алгоритма позволяет улучшить качество излучения на объекте фокусировки.

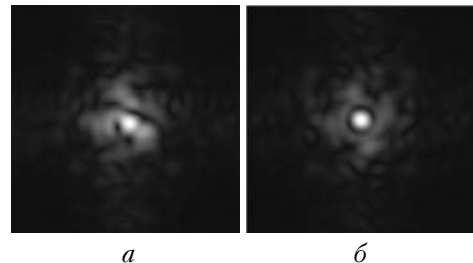


Рис. 10. Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения, регистрируемое при наличии искажений (a), и полученное в результате коррекции (б). Длина трассы  $Z = 2,5$ , интервал случайных фазовых искажений  $\Delta\phi = 1,5\pi$ , расстояние между центрами  $d = 2$ , конфигурация 3

Использование апертурного зондирования для коррекции случайных искажений иллюстрируется на рис. 11–13, где показаны изменения критерия фокусировки в итерационном процессе.

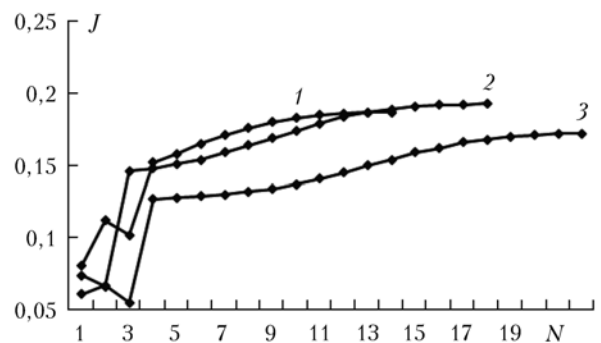


Рис. 11. Изменение критерия фокусировки  $J$  в процессе адаптивного управления:  $N$  – номер итерационного шага. Данные получены для конфигурации 2 (4 пучка). Номера кривых соответствуют длинам трасс  $Z = 2,5$  (кривая 1), 3,5 (2) и 4,5 (3),  $d = 2$ . Интервал фазовых искажений  $\Delta\phi = 1,5\pi$

Наиболее высокое значение критерия фокусировки  $J$  в результате коррекции было получено для конфигурации 3 на длине трассы  $Z = 2,5$  (рис. 11, кривая 1,  $\Delta\phi = 1,5\pi$ ). В точно таких же условиях для конфигурации 2 (рис. 12, кривая 1) значения критерия были существенно меньше, т.е. эффективность передачи энергии при помощи 8-пучковой системы на 20–30% больше по сравнению с конфигурацией, состоящей из 4 пучков. Однако на более длинных трассах ( $Z = 3,5 \div 4,5$ ), где эффективность коррекции уменьшается, это различие менее выражено. Или другими словами: если искажения скомпенсировать невозможно, не имеет значения, какую конфигурацию мы используем для передачи энергии.

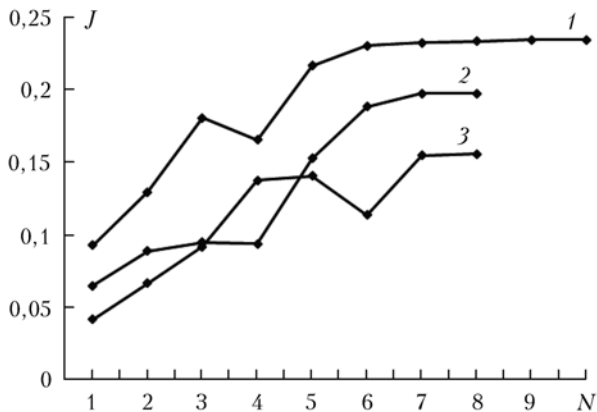


Рис. 12. Результат коррекции при генерации излучения набором субапертур, расположенных в конфигурации 3 (8 пучков). Остальные данные см. подпись к рис. 11

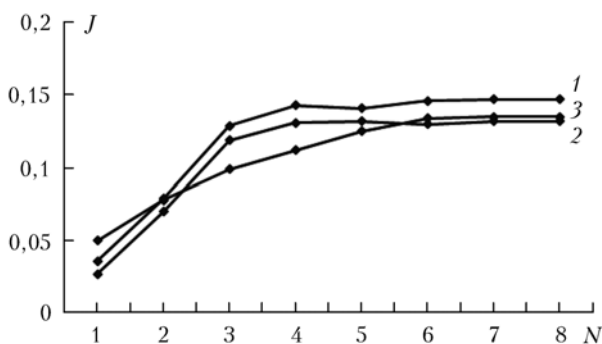


Рис. 13. Повторение результатов предыдущего численного эксперимента при увеличенном интервале фазовых искажений. Конфигурация 3, интервал фазовых искажений  $\Delta\varphi = 3\pi$

Эффективность коррекции также уменьшается при увеличении интервала случайных фазовых искажений. Соответствующие данные для конфигурации 3 представлены на рис. 13. В этом случае результирующие значения критерия не превышают 0,15, кривые для трасс  $Z = 2,5$  и  $4,5$  отличаются не более чем на 0,03, отличие между трассами  $Z = 3,5$  и  $4,5$  практически не регистрируется.

Приведенные данные показывают, что при использовании алгоритма апертурного зондирования наблюдается уменьшение эффективности коррекции при увеличении интенсивности искажений. При этом эффективность управления зависит от конфигурации расположения пучков на излучающей апертуре. Так, лучшие, наиболее близкие к дифракционно-ограниченным результатам значения критерия были получены для конфигурации 3 на длине трассы  $Z = 2,5$ .

### Заключение

Таким образом, результаты численных экспериментов, приведенные в настоящей статье, позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование оптоволоконного лазера для передачи энергии в неискажающей среде является целесообразным только на относительно длинных трассах ( $Z > 2,5$ ), при этом оптимальное расстояние

между центрами субапертур составляет 1,5–2,5 начальных диаметра элементарного пучка.

2. Наиболее значительное уменьшение критерия фокусировки (приблизительно в 4 раза) с увеличением ширины интервала фазовых искажений наблюдается для конфигурации 3, включающей 8 лазерных пучков, обеспечивающей в отсутствие искажений передачу энергии с наибольшей эффективностью.

3. В турбулентной среде многоканальная система позволяет получить более высокое качество излучения на объекте фокусировки по сравнению с одномодовым лазерным пучком. Только при высокой интенсивности искажений ( $r_0 < 0,04$ ) значения критерия становятся близкими к данным, соответствующим гауссовскому излучению.

4. При использовании алгоритма апертурного зондирования для компенсации искажений, возникающих в системе, наблюдается уменьшение эффективности коррекции с увеличением ширины интервала случайных фазовых набегов. При этом эффективность управления зависит от конфигурации расположения пучков на излучающей апертуре и лучшие результаты наблюдаются для конфигурации 3.

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Huo Y., Cheo P.K. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers // J. Opt. Soc. Amer. B. 2005. V. 22, N 11. P. 2345–2349.
5. Grime B.W., Roh W.B., Alley Th.G. Phasing of a two-channel continuous-wave master oscillator-power amplifier by use of a fiber phase-conjugate mirror // Opt. Lett. 2005. V. 30, N 18. P. 2415–2417.
6. 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.
7. Fan X., Liu J., Liu J., Wu J. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array // Chinese Opt. Lett. 2010. V. 8, N 1. P. 48–51.
8. Gopinath J.T., Chann B., Fan T.Y., Sanchez-Rubio A. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array // Opt. Express. 2008. V. 16, N 13. P. 9405–9409.
9. Lei B., Feng Y. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop // Opt. Express. 2007. V. 15, N 25. P. 17114–17119.
10. 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.
11. 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.
12. Wang B., Mies E., Minden M., Sanchez A. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array // Opt. Lett. 2009. V. 34, N 7. P. 863–865.



13. Kozlov V.A., Hernandez-Cordero J., Morse T.F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers // Opt. Lett. 1999. V. 24, N 24. P. 1814–1816.
14. Cao J., Hou J., Lu Q., Xu X. Numerical research on self-organized coherent fiber laser arrays with circulating field theory // J. Opt. Soc. Amer. B. 2008. V. 25, N 7. P. 1187–1192.
15. Zhou Pu, Liu Z., Xu X., Chen Z. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams // Appl. Opt. 2008. V. 47, N 18. P. 3350–3359.
16. Fan T.Y. The effect of amplitude (power) variations on beam combining efficiency for phased arrays // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics. 2009. V. 15, N 2. P. 291–293.
17. 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.
18. Zhou Pu, Ma Y., Wang X., Ma H., Wang J., Xu X., Liu Z. Coherent beam combination of a hexagonal distributed high power fiber amplifier array // Appl. Opt. 2009. V. 48, N 33. P. 6537–6540.
19. 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.
20. 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.
21. Воронцов М.А., Чесноков С.С. Метод численного исследования адаптивных оптических систем апертурного зондирования // Изв. вузов. Радиофиз. 1982. Т. 25, № 11. С. 1310–1316.
22. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П., Сухоруков А.П., Чесноков С.С. Тепловое самовоздействие световых пучков и методы его компенсации // Изв. вузов. Радиофиз. 1980. Т. 28, № 1. С. 1–22.
23. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения / Под ред. В.Е. Зуева. Томск: Изд-во Томского филиала СО АН СССР, 1987. 246 с.
24. Банах В.А., Смелихо И.Н. Распространение лазерных пучков на вертикальных и наклонных протяженных трассах через турбулентную атмосферу // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 4. С. 377–384.

*O.L. Antipov, F.Yu. Kanev, E.I. Tsyro, D.S. Kuksenok.* **Adaptive correction of distortions in multi-channel optical system.**

An analysis of current investigations of multichannel laser systems is presented in the paper. Sources of aberrations in such systems are described along with the methods of their active and passive compensation. Numeric investigation of multimode beam propagation has been carried out. Influence was studied of random phase shifts and atmospheric turbulence on the beam parameters registered in the plane of observations. Application of the multidither algorithm for correction of these distortions was analyzed, and the obtained results and possibility of transferring energy with the use of the system are discussed.