

ТРОФИМОВ ВЯЧЕСЛАВ ВИКТОРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МНОГОПУЧКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ  
АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 05.13.05-элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре радиоэлектронных и квантовых устройств  
Казанского государственного университета им. А.Н. Туполева.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Воронов В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Белавин В.А.

кандидат технических наук, доцент  
Николаев Р.П.

Ведущая организация: ФНПЦ «Государственный институт  
прикладной оптики»

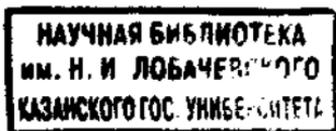
Защита состоится «24» НОЯБРЯ 2003 г. в 10:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.079.04 в Казанском государственном  
техническом университете им. А.Н. Туполева по адресу: 420111, г. Казань,  
ул. К. Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского  
государственного технического университета им. А.Н. Туполева.

Автореферат разослан «22» октября 2003 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета,  
кандидат технических наук



В.А. Козлов

### Актуальность темы.

Разработка и создание многопучковых лазерных систем является одним из перспективных направлений лазерной техники. Многопучковые лазеры находят широкое применение в технологии, оптической астрономии, системах передачи световой энергии на далёкие расстояния, открытых лазерных системах связи. По сравнению с однопучковыми лазерами такой же мощности многопучковые системы являются более компактными источниками, так как каналы генерации отдельных пучков обычно располагаются параллельно, что приводит лишь к увеличению поперечных габаритов лазера.

К многопучковым лазерам относятся: многоканальные лазеры, лазеры на многоходовых модах (М-модах), решётки полупроводниковых лазеров. Многоканальный принцип построения лазера позволяет эффективно и просто осуществлять накачку энергии в активную среду и отвод тепла из её объёма.

Однако существуют ряд факторов, ограничивающих практическое применение многопучкового лазерного излучения. В технологических системах таким фактором выступает сложность фокусировки многопучкового излучения. В атмосферных оптических линиях связи (АОЛС) отрицательное влияние на его свойства оказывают: во-первых, сильная зависимость дальности лазерной связи от метеоусловий и, во-вторых, отсутствие прецизионной и высокоскоростной системы наведения лазерного луча на приёмник, находящийся на расстоянии, большем 1000 м от передатчика.

На сегодняшний день производители оборудования, использующего лазерное излучение, используют различные методы для снижения влияния указанных факторов. Так производители технологических лазеров применяют сложные системы фокусировки многопучкового излучения, различные схемы внутрирезонаторной коррекции. Для снижения влияния атмосферной турбулентности на качество связи изготовители АОЛС также применяют такие подходы, как увеличение мощности и расходимости лазерного излучения,

увеличение диаметра приёмной оптики, увеличение числа приёмных апертур, некогерентное сложение излучения нескольких лазеров.

В то же время одним из возможных способов, позволяющих улучшить фокусировку излучение многопучковых лазеров, корректировать aberrации волновых фронтов в режиме реального времени, формировать лазерное излучение с заданным распределением интенсивности в некоторой области пространства, является применение адаптивных оптических систем (АОС).

Принцип работы АОС заключается в том, чтобы, воздействуя на волновой фронт, оптимизировать характеристики лазерного излучения. С этой целью в оптическом тракте системы устанавливается адаптивное зеркало, способное заданным образом деформировать фазовый фронт принимаемой или передаваемой волны.

Вместе с тем в настоящее время в литературе отсутствует информация о попытках применения АОС для коррекции излучения многопучковых лазерных систем, об алгоритмах управления и особенностях их использования в тех или иных условиях.

Данная работа посвящена разработке алгоритмов адаптивной коррекции многопучковых лазеров и исследованию характеристик высокоэффективных АОС, работающих на основе данных алгоритмов. Такие системы могут применяться, во-первых, для компенсации вредного влияния турбулентной атмосферы на свойства распространяющегося в ней лазерного излучения, и, во-вторых, для адаптивной фокусировки излучения многопучковых технологических лазеров.

Целью работы является улучшение характеристик многопучковых лазерных систем на основе одновременного управления наклонами волновых фронтов нескольких пучков, образующих многопучковое излучение.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Изучение современного состояния и развития многопучковых лазерных систем и оценка особенностей их работы в различных условиях;

2. Разработка математических моделей адаптивных оптических систем для управления излучением многопучковых технологических лазеров, а также систем угловой коррекции лазерных пучков, распространяющихся в турбулентной атмосфере;
3. Разработка эффективных алгоритмов адаптивной коррекции излучения многопучковых лазеров;
4. Создание программного обеспечения и проведение численного моделирования многопучковых лазерных систем с адаптивной коррекцией излучения на основе предложенных алгоритмов;
5. Исследование эффективности предложенных алгоритмов, работающих в составе конкретной системы программного управления многопучковым передатчиком АОЛС;
6. Выработка предложений по использованию разработанных алгоритмов в системах адаптивной коррекции многопучковых лазеров, работающих в различных условиях.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы математического и имитационного моделирования, реализованные в рамках численных экспериментов.

Научная новизна работы представлена следующими результатами:

1. Предложена схема системы адаптивной коррекции случайных наклонов волновых фронтов для многопучкового лазера «Юпитер», изучены особенности различных алгоритмов коррекции излучения. Предложены два варианта управления системой - «параллельный» и «последовательный». Установлено, что «последовательный» вариант является более эффективным, чем «параллельный»;
2. Изучено влияние параметров оптической системы измерительно-управляющего канала системы угловой коррекции и параметров лазерного излучения (поляризации) на процесс адаптации. Показано, что

при оптимальном выборе параметров оптической системы можно существенно ослабить требования к алгоритму коррекции. Предложен быстродействующий алгоритм на основе градиентного метода. Изучены особенности его работы;

3. Предложена схема адаптивной коррекции наклонов волновых фронтов многопучкового излучателя, функционирующего в условиях турбулентной атмосферы и образованного тремя взаимно некогерентными лазерами. Для управления системой коррекции разработаны алгоритмы на основе градиентного метода и метода Ньютона, изучены их свойства;
4. На базе пакета LabVIEW проведено имитационное моделирование системы угловой коррекции случайных смещений пучков, возникающих в турбулентной атмосфере, предназначенной для работы в составе многопучкового излучателя АОЛС.

#### **Практическая ценность диссертации.**

Результаты диссертационной работы использованы в ООО «Телесет» (г. Казань) при разработке проекта по развёртыванию атмосферных оптических линий связи в составе сетей передачи данных, а также в НИР «Численное моделирование и исследование процессов адаптивной юстировки лазерного передатчика высокоскоростного атмосферного канала связи» по гранту Т02-03.1-2577 Министерства образования РФ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и её отдельные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

1. VII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана» (Томск, ИОАСОРАН, 2000 г.);
2. Конференция молодых учёных, посвященная 10-летию ИВТ СО РАН (Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2000 г.);

3. Юбилейная научно-техническая конференция «Автоматика и электронное приборостроение», посвященная 50-летию факультета автоматики и электронного приборостроения КГТУ им. А.Н. Туполева (Казань, КГТУ, 2001 г.);
4. IX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана» (Томск, ИОА СО РАН, 2002 г.);
5. X Юбилейный международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, ИАО СО РАН, 2003 г.).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модели систем адаптивной коррекции лазерных излучателей со взаимно когерентными и взаимно некогерентными пучками;
2. Эффективные алгоритмы адаптивной коррекции, повышающие качество многопучкового лазерного излучения со взаимно когерентными и взаимно некогерентными пучками;
3. Комплекс программ для численного моделирования многопучковых лазерных систем с адаптивной коррекцией излучения;
4. Результаты исследования влияния параметров оптики на поведение адаптивных систем коррекции многопучкового лазерного излучения, включая оптимальные соотношения между размерами диафрагмы измерительного канала и диаметром пучков;
5. Результаты анализа влияния шумовых воздействий на работу системы адаптивной коррекции.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, включая 5 статей и 4 тезисов докладов.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объём работы 177 страницы. Основной текст диссертации содержит 167 страницы машинописного текста, 55 формул, 70 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 73 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и основные задачи диссертационной работы, приводится краткое содержание глав диссертации, показана научная новизна и её практическая значимость. Определены выносимые на защиту основные положения работы.

В первой главе проведён аналитический обзор источников и областей применения многопучковых лазерных систем, рассматриваются существующие системы управления многопучковым лазерным излучением, их возможности, ограничения и недостатки.

К многопучковым лазерам относятся: многоканальные волноводные технологические  $\text{CO}_2$ -лазёры, лазеры на М-модах, решётки и сборки полупроводниковых лазеров. Такие типы лазеров находят широкое применение в астрономии, медицине, технологии, системах связи. В частности, на сегодняшний день системы АОЛС изготавливают такие производители телекоммуникационного оборудования, как Lucent, Alcatel, PAV Data Systems, российские компании - ФГУП НИИ «Полюс», ФГУП НИИ прецизионного приборостроения, Информационно-технологический центр, Государственный рязанский приборный завод, НПК «Катарсис», ООО «Мостком».

К недостаткам многопучковых технологических лазеров можно отнести сложность фокусировки и получения заданного распределения интенсивности излучения. Для лазеров на М-модах - наличие случайных наклонов волновых фронтов пучков, которые обусловлены неоднородностями активной среды. На качество связи АОЛС существенно влияют различные факторы, вызывающие смещение лазерных пучков от нормали, а именно, колебания зданий, ослабление и рассеяние сигнала, влияние турбулентностей атмосферы, которое выражается во флуктуациях фазы и интенсивности, уширении, случайных смещениях, флуктуациях угла прихода и расщеплении лазерных пучков.

Для уменьшения влияния названных факторов производители лазерного оборудования применяются различные методы. В технологических лазерных установках применяются сложные системы фокусировки излучения и различные методы внутрирезонаторной коррекции. Производители оборудования АОЛС также используют разные подходы для снижения вредного влияния турбулентной атмосферы на качество связи.

Обзор литературных данных показал, что до настоящего времени для решения проблем, возникающих при транспортировке и фокусировке многопучкового лазерного излучения, адаптивные системы находили ограниченное применение. В частности, в периодических изданиях отсутствует информация о практическом применении АОЛС, в которых одновременно корректируются наклоны нескольких лазерных пучков на выходе излучателя.

В диссертации для управления многопучковым лазерным излучением предлагается использовать адаптивные системы угловой коррекции.

На основании материалов данной главы сформулированы основные задачи исследования и определены концепции их решения.

**Во ВТОРОЙ главе** предложены и исследуются алгоритмы управления многопучковыми лазерами со взаимно когерентными пучками, изучается влияние параметров системы и поляризации излучения на работу этой системы адаптивной коррекции.

В системах зондирования атмосферы при использовании в качестве источников многопучкового излучения лазеров на М-модах возникает необходимость коррекции наклонов волновых фронтов, которые обусловлены случайными неоднородностями активной среды лазера и турбулентностью атмосферы. Для решения подобной задачи применительно к многопучковому лазеру «Юпитер» с кольцевым сечением выходного пучка предложена двухканальная схема системы коррекции. В этой системе задачей первого канала является обеспечение начальной параллельности всех пучков на входе в среду, а второго - обеспечение их последующей адаптации к атмосферным

искажениям. В данной главе изучаются особенности работы первого канала коррекции, предназначенного для компенсации наклонов волновых фронтов на выходе лазера «Юпитер».

Исходя из требований простоты и удобства измерения, критерием качества коррекции системы выбран функционал фокусировки  $J_d$ , который определяется стандартным образом, как  $J_d = P/P_0$ , где  $P$  - мощность излучения, проходящего через диафрагму в измерительно-управляющем канале,  $P_0$  - мощность проходящего излучения для случая, когда центры всех пучков сведены в центр диафрагмы. Для вычисления мощности  $P$  в пределах диафрагмы использовано выражение:

$$P \approx \int_0^a \int_0^{2\pi} \left| \sum_{j=1}^{2N} A_j(r, \psi) * e^{i\Phi_j(r, \psi)} \right|^2 * r dr d\psi, \quad (1)$$

где  $a$  - радиус диафрагмы,  $A_j(r, \psi)$ ,  $\Phi_j(r, \psi)$  - амплитуда и фаза  $j$ -го пучка,  $r$  и  $\psi$  - текущие радиальная и угловая координаты в пределах диафрагмы. Индекс  $2N$  определяет количество лучевых потоков лазера «Юпитер».

В этом случае задача управления лучевыми потоками сводится к нахождению такого взаимного углового положения лазерных пучков, при котором функционал фокусировки достигает максимального значения.

Разработана математическая модель системы адаптивной коррекции, получено выражение для функционала фокусировки, характеризующего качество многопучкового излучения лазеров, работающих на М-модах.

В данном исследовании была выявлена сильная изрезанность зависимости функционала фокусировки от управляющих воздействий. Наличие локальных максимумов  $J_d$  существенно затрудняет выбор конкретного алгоритма управления. В связи с этим для системы адаптивной коррекции предложено два варианта управления пучками - «параллельный» и «последовательный». В первом случае система коррекции сводит каждый лучевой поток в центр диафрагмы только после полного сведения предыдущего. При этом для полного сведения одного пучка требуется, как правило, несколько шагов управления. Во втором случае пучки сводятся

чередующимися шагами управления, очередной шаг для текущего пучка выполняется сразу после завершения соответствующего шага управления для предыдущего.

Анализ работы системы коррекции показал, что «последовательный» вариант управления характеризуется меньшей изрезанностью критерия качества и является более эффективным по сравнению с «параллельным» при использовании метода покрытий для вычисления управляющих воздействий.

Численное моделирование работы системы коррекции проводилось применительно к лазеру «Юпитер», параметры которого характеризуются следующими значениями: длина волны излучения лазера  $\lambda = 10.6$  мм, радиус кольца излучения на выходной апертуре лазера  $R_{\text{ср}} = 40$  мм, фокусное расстояние системы фокусировки излучения в плоскость диафрагмы  $f = 304$  мм, радиус пучка в перетяжке  $W = 0.3$  мм, радиус диафрагмы  $a = 0.01$  мм, погрешность вычислений методом покрытий  $\epsilon = 0.005$ . Начальное положение пучков  $r_{\text{ср}j \text{ нач}}$  задавалось с помощью генератора случайных чисел в пределах 0.3 мм от центра диафрагмы.

Моделирование проводилось сериями численных экспериментов, каждый из которых характеризовался случайным начальным распределением пучков в плоскости диафрагмы. Результаты моделирования системы адаптации, работающей по «последовательному» алгоритму представлены в таблице.

Таблица

Результаты численного моделирования системы коррекции

Номер луча	Число шагов адаптации	$r_{\text{ср}j \text{ нач}}$ , мм	$r_{\text{ср}j \text{ конц}}$ , мм	$J_d$	$\psi_{j \text{ нач}}$	$\psi_{j \text{ конц}}$
1	29	0.08	0.04	0.058	$\pi/8$	$\pi/8$
2	25	0.06	0.04	0.083	$2\pi/8$	$2\pi/8$
3	26	0.18	0.03	0.124	$3\pi/8$	$\pi + 3\pi/8$
4	24	0.10	0.04	0.181	$\pi/2$	$\pi + \pi/2$
5	25	0.24	0.03	0.263	$5\pi/8$	$\pi + 5\pi/8$
6	30	0.06	0.03	0.326	$6\pi/8$	$\pi + 6\pi/8$

Продолжение таблицы

Номер луча	Число шагов адаптации	$\Gamma_{ср\ j\ нач.}$ мм	$\Gamma_{ср\ j\ конеч.}$ мм	$J_d$	$\Psi_{j\ нач.}$	$\Psi_{j\ конеч.}$
7	27	0.20	0.04	0.354	$7\pi/8$	$\pi + 7\pi/8$
8	22	0.10	0.04	0.434	$\pi$	$2\pi$
9	29	0.04	0.03	0.436	$9\pi/8$	$\pi/8$
10	29	0.04	0.03	0.438	$10\pi/8$	$2\pi/8$
11	26	0.28	0.04	0.486	$11\pi/8$	$11\pi/8$
12	34	0.04	0.03	0.484	$3\pi/2$	$12\pi/8$
13	30	0.06	0.04	0.574	$13\pi/8$	$13\pi/8$
14	31	0.16	0.04	0.758	$14\pi/8$	$14\pi/8$
15	30	0.18	0.04	0.882	$15\pi/8$	$15\pi/8$
16	36	0.06	0.03	0.999	$2\pi$	$2\pi$

Полученные данные свидетельствуют, что по окончании процесса адаптации функционал фокусировки имеет значение  $J_d \geq 0.99$ . Таким образом, численный анализ показал, что в общем случае предложенный алгоритм адаптации позволяет выполнить фокусировку многопучкового лазерного излучения со взаимно когерентными пучками с требуемым качеством, которое для большинства АОС определяется как соотношение  $J_d > 0.8$ . Однако существенным недостатком предложенного алгоритма является большое число шагов адаптации - порядка 450. Это повышает требования к объёму оперативной памяти и быстродействию вычислительного и управляющего устройств при практическом использовании систем коррекции в лазерах со взаимно когерентными пучками. Поэтому следующей важной задачей исследования стал поиск путей повышения быстродействия системы адаптивной коррекции. Для этого было проведено исследование влияния параметров системы, в частности, размера диафрагмы на качество адаптации.

Результаты исследования представлены на рис. 1. На этом рисунке графики 1, 2, 3 соответствуют различному начальному положению лучевых потоков в плоскости диафрагмы.

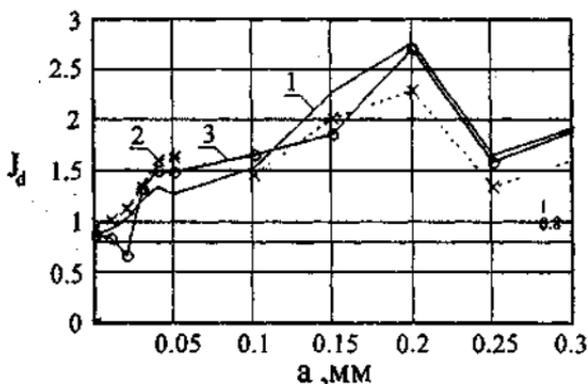


Рис. 1. Значения функционала фокусировки по окончании процесса адаптации в зависимости от радиуса диафрагмы

Численный анализ показал, что при радиусе диафрагмы большем 0.02 мм сквозь неё проходит излучение локальных максимумов интенсивности, когда пучки ещё не сведены в центр. В результате значение функционала фокусировки  $J_d$  становится большим 1. Таким образом, максимальный радиус диафрагмы, при котором адаптация осуществляется с необходимым качеством ( $J_d > 0.8$ ) равен 0.02 мм, при этом соотношение радиус пучка/радиус диафрагмы равно  $W/a = 15$ .

Практическое использование диафрагм такого малого размера в измерительно-управляющем канале адаптивной системы нецелесообразно, так как возможно возникновение ситуации, когда отношение сигнал/шум на выходе фотоприёмника может оказаться недостаточным для эффективного функционирования системы. По этой причине было проведено дополнительное исследование влияния других параметров системы на качество коррекции.

Одним из таких параметров, определяющих фазовые соотношения интерферирующих пучков в плоскости диафрагмы, является фокусное расстояние оптической системы сведения лучей  $f$ . Поз/тому на следующем этапе изучалось влияние фокусного расстояния на величину функционала

фокусировки. При численном моделировании радиус диафрагмы принимался равным 0.2 мм. Начальное расположение пучков устанавливалось генератором случайных чисел в плоскости диафрагмы на расстоянии, не превышавшем 0.5 мм от её центра.

Исследования показали, что увеличение фокусного расстояния приводит к существенно более благоприятным условиям работы системы адаптации. Так при  $f \geq 3000$  мм зависимость функционала фокусировки сглаживается, при этом максимум  $Jd$  располагается вблизи центра диафрагмы.

С учётом вышесказанного был предложен «комбинированный» алгоритм управления системой адаптивной коррекции: на первом этапе для каждого пучка методом перебора определяется начальное приближение к максимуму критерия качества, на втором этапе используется градиентный метод, с помощью которого уточняется положение максимума.

В градиентных методах точка экстремума определяется в ходе итерационной процедуры:

$$\mathbf{a}^{(n+1)} = \mathbf{a}^{(n)} + \alpha^{(n)} J'(\mathbf{a}^{(n)}), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где  $\mathbf{a}^{(n)}$  - управляющее воздействие на  $n$  итерации,  $J'(\mathbf{a})$  - первая производная показателя качества. Шаг градиентного метода рассчитывался по формуле:

$$\alpha^{(n)} = \frac{\alpha}{(J'(\mathbf{a}^{(n)}))^2}, \quad (3)$$

где параметр градиентного метода  $\alpha = \text{const}$ .

При моделировании использовались следующие параметры: погрешность вычислений  $\varepsilon = 0.002$ , радиус диафрагмы  $a = 0.2$  мм, фокусное расстояние  $f = 3000$  мм, параметр градиентного метода  $\alpha = 0.005$ .

На рис. 2 показано поведение функционала фокусировки в процессе адаптации, осуществляемой различными алгоритмами: алгоритмом, основанным на методе покрытий (зависимость 1), и алгоритмом, основанном на «комбинированном» методе (зависимость 2).

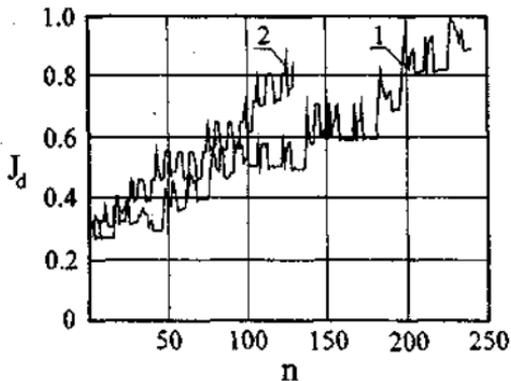


Рис. 2. Изменение функционала фокусировки в процессе адаптации: график 1 соответствует алгоритму с использованием метода покрытий, график 2 - с использованием «комбинированного» метода

В ходе исследований было установлено, что в первом случае для завершения адаптации с требуемым качеством требуется порядка 240 итераций ( $J_d = 0.99$ ), во втором - порядка 130 итераций ( $J_d = 0.88$ ). Таким образом, применение алгоритма, основанного на «комбинированном» методе для завершения адаптации с необходимым качеством требует почти в два раза меньшего количества итераций.

Чтобы определить влияние размера диафрагмы на качество адаптации системы, в которой реализован «комбинированный» метод, было проведено моделирование её работы при различных значениях размера диафрагмы и фокусных расстояниях оптической системы.

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 3.

Выполненные исследования показали, что при фокусном расстоянии  $f \geq 3000$  мм изменение размера диафрагмы от 0.07 мм до 0.3 мм не оказывает существенного влияния на качество адаптации. Таким образом, увеличение фокусного расстояния оптической системы позволяет увеличить размер диафрагмы, при котором адаптация выполняется с требуемым качеством.

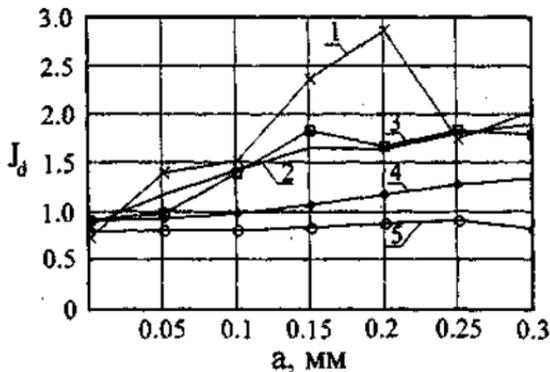


Рис. 3. Зависимость функционала фокусировки по окончании адаптации от радиуса диафрагмы: 1 - при  $f = 304$  мм, 2 -  $f = 600$  мм, 3 -  $f = 1000$  мм, 4, 5 -  $f = 3000$  мм. Графики 1 - 4 соответствуют адаптации методом покрытий, график 5 - «комбинированным» методом

Для изучения влияние поляризации излучения на качество адаптивной коррекции был проведён анализ работы системы при суммарном воздействии парциальных компонент излучения (**s- и p-компонент**). При этом амплитуда волны излучения каждой из компонент задавалась следующим образом:

$$A_{sj} = e^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} * |\sin(\psi_{0j})|, \quad (4a)$$

$$A_{pj} = e^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} * |\cos(\psi_{0j})|. \quad (4б)$$

При этом мощность излучения в пределах диафрагмы определялась как:

$$P \approx \int_0^a \int_0^{2\pi} \left( \sum_{j=1}^{2N} A_{sj}(r, \psi) * e^{i\Phi_{sj}(r, \psi)} \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^{2N} A_{pj}(r, \psi) * e^{i\Phi_{pj}(r, \psi)} \right)^2 * r dr d\psi, \quad (5)$$

где  $\Phi_{sj}$  и  $\Phi_{pj}$  - фазы пучков в плоскости диафрагмы для s- и p-компонент соответственно. В этой формуле квадрат модуля первого слагаемого в подынтегральном выражении соответствует s-компоненте излучения, квадрат модуля второго слагаемого - p-компоненте.

Анализ работы системы показал, что поляризационные свойства излучения не оказывают существенного влияния на характеристики системы коррекции.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов управления многопучковыми лазерными системами со взаимно некогерентными пучками.

Предложена структурная схема системы адаптивной коррекции, предназначенной для использования в составе передатчика АОЛС (рис. 4).

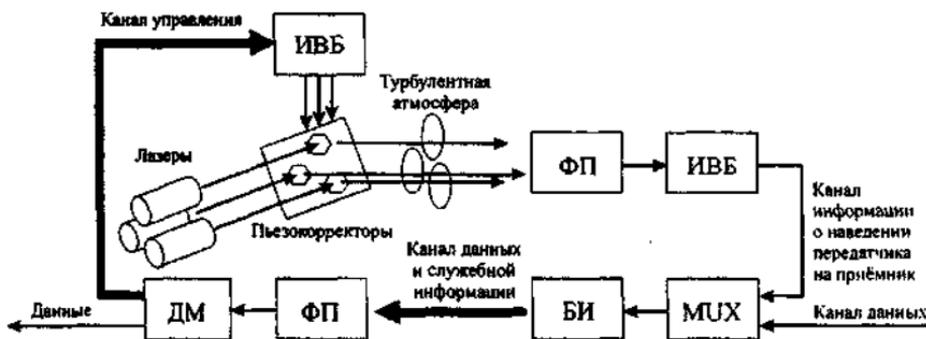


Рис. 4. Структурная схема системы адаптивной коррекции излучения нескольких взаимно некогерентных лазеров: БИ - блок излучателей, ИВБ - измерительно-вычислительный блок, ФП - фотоприёмник, М - мультиплексор, ДМ - демultipлексор

Разработана математическая модель системы адаптивной коррекции. В этом случае использовалась иная формула для мощности излучения лазерных пучков, учитывающая их взаимную некогерентность:

$$P \approx \int_0^{2\pi} \int_0^r \sum_{j=1}^n |A_j(R_j, \Psi_j, r, \psi)|^2 * r dr d\psi, \quad (6)$$

где  $r$  и  $\psi$  - текущие радиальная и угловая координаты, координаты  $R_j$  и  $\Psi_j$  определяют положение пучков в плоскости диафрагмы,  $n$  - число лазерных пучков.

Поскольку число пучков в конкретных АОЛС, как правило, не превышает трёх, численное моделирование проводилось для лазерных передатчиков именно с таким числом пучков.

По результатам моделирования было установлено, что в этом случае зависимость функционала фокусировки от величины управляющих воздействий является гладкой функцией и имеет один глобальный максимум. В

этом случае появляется возможность использовать для угловой коррекции два алгоритма: на основе градиентного метода и на основе метода Ньютона.

При использовании метода Ньютона точка экстремума определяется в ходе итерационной процедуры:

$$u_{k+1} = u_k - \beta_k \frac{J(u_k)}{J'(u_k)}, \quad (7)$$

где  $\beta_k$  - параметр метода Ньютона,  $J(u_k)$  и  $J'(u_k)$  - соответственно, значение функционала фокусировки и его первой производной на  $k$ -ой итерации.

Для выбора наиболее эффективного алгоритма было исследовано поведение функционала фокусировки в процессе адаптации при «последовательном» и «параллельном» вариантах управления.

Моделирование производилось при следующих параметрах системы: радиус пучков  $W = 0.3$  мм, погрешность градиентного метода  $\epsilon = 0.01$ , параметр градиентного метода  $\alpha = 0.1$ , погрешность метода Ньютона  $\epsilon = 0.01$ , параметр метода Ньютона  $\beta = -0.4$ . Исследования проводились для систем с различными фокусными расстояниями  $f$ , задаваемыми в диапазоне от 2500 до 4000 мм, и радиусами диафрагмы  $a$  в диапазоне от 0.1 до 0.3 мм.

Типичные результаты численного моделирования показаны на рис. 5.

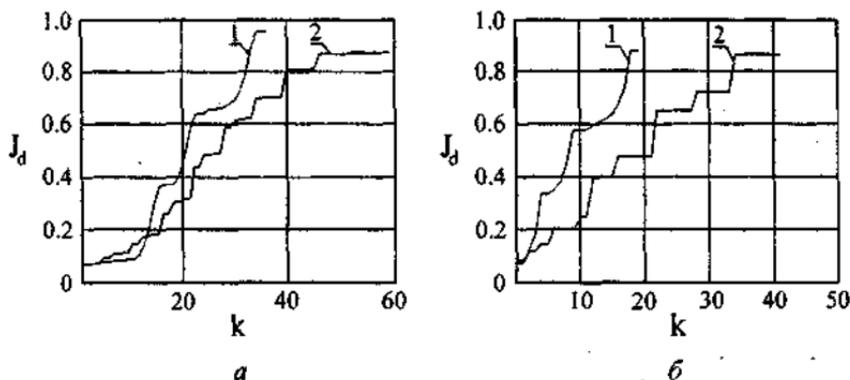


Рис. 5. Изменение функционала фокусировки в процессе адаптации:  $a$  - градиентным методом,  $b$  - методом Ньютона; график 1 соответствует «последовательному», 2 - «параллельному» варианту управления пучками при параметрах системы:  $f = 3000$  мм,  $a = 0.2$  мм

Численный анализ показал, что и в этом случае «последовательный» вариант управления системой является более эффективным, чем «параллельный», обеспечивая большее быстродействие при более высоком качестве адаптации. Кроме того, алгоритм, основанный на методе Ньютона, позволяет почти в два раза увеличить быстродействие системы по сравнению с алгоритмом, использующим градиентный метод.

В четвертой главе представлены результаты имитационного моделирования системы угловой коррекции излучения взаимно некогерентных лазеров, применяемой в составе лазерного передатчика АОЛС. Исследовалось качество работы системы адаптивной коррекции, а также поведение системы при воздействии шумовых сигналов.

В первом разделе главы IV представлена возможная структурная схема системы угловой коррекции. Управление системой осуществляется программой, разработанной на основе языка графического программирования измерительно-управляющего комплекса LabView. Представлено описание алгоритмов, программного обеспечения, функциональных схем виртуальных инструментов, используемых в процессе имитационного моделирования.

Выбраны параметры системы угловой коррекции, соответствующие параметрам типовых АОЛС, а также параметры атмосферы, соответствующие режиму слабых флуктуации. Проведено моделирование работы системы коррекции «последовательным» вариантом управления, реализованным в рамках градиентного метода ( $a = 0.02$ ). Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 6.

В ходе исследований определены показатели качества системы угловой коррекции. Получена переходная характеристика системы, по которой определено время регулирования. Вычислена динамическая ошибка  $\epsilon_d = 0.005$  и среднеквадратическая ошибка  $\epsilon_{ср.кв} = 0.002$ .

Изучено поведение системы угловой коррекции при отсутствии шумовых воздействий и в присутствии шумов. Установлено, что для принятых при

моделировании параметрах система сохраняет работоспособность в условиях, когда уровень шумов не превышает  $P_{\text{шума}} = 0.07 P_{\text{сигнала}}$ , что соответствует уровню сигнал/шум, равному 11.5 дБ.

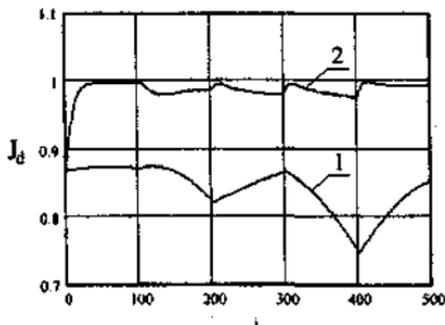


Рис. 6. Изменение функционала фокусировки: график 1 - без адаптации, график 2 - в процессе адаптации ( $\alpha = 0.02$ )

Произведено сравнение быстродействия «последовательного» и «параллельного» вариантов управления системой. Установлено, что при использовании «последовательного» варианта управления коррекция внешнего возмущения осуществляется почти в 4 раза быстрее, чем при использовании «параллельного» варианта. Полученные результаты подтвердили результаты теоретических исследований, полученные в предыдущих главах, в частности, о том, что «последовательный» вариант является более быстродействующим, чем «параллельный».

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложении 1** представлен Акт внедрения результатов НИР «Численное моделирование и исследование процессов адаптивной юстировки лазерного передатчика высокоскоростного атмосферного канала связи» по договору РЭКУ-1/03 от «8» января 2003 г. между КГТУ им. А.Н. Туполева и ООО «Телесет».

**В приложении 2** приведён текст программы имитационного моделирования системы коррекции в программном пакете Lab View.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе численного моделирования изучены характеристики адаптивных систем коррекции многопучковых лазеров со взаимно когерентными и взаимно некогерентными пучками излучения;
2. Предложен «последовательный» вариант управления системой коррекции многопучкового излучения со взаимно когерентными пучками являющийся более эффективным, чем «параллельный», что обеспечивает большее быстроедействие системы при более высоком качестве излучения;
3. Разработан эффективный алгоритм коррекции на основе метода покрытий, который обеспечивает требуемое качество фокусировки в процессе коррекции многопучкового излучения со взаимной когерентностью пучков;
4. Показано, что параметры оптики системы коррекции существенно влияют на качество фокусировки взаимно когерентных пучков. При этом требуемое качество фокусировки (функционал фокусировки  $J_d \approx 0.8$ ) достигается, если размер пучка более, чем на порядок превышает размер диафрагмы. Увеличение фокусного расстояния приводит к сглаживанию зависимости критерия качества от величины управляющих воздействий;
5. Предложен эффективный «комбинированный» алгоритм управления системой коррекции многопучкового излучения со взаимно когерентными пучками, учитывающий особенности оптического тракта. Показано, что данный алгоритм позволяет почти в два раза уменьшить количество итераций по сравнению с алгоритмом, использующим метод покрытий;
6. Установлено, что функционал фокусировки для нескольких взаимно некогерентных лазеров является достаточно гладкой функцией, что позволяет использовать алгоритмы коррекции на основе двух методов: градиентного и метода Ньютона. При этом использование метода

Ньютона обеспечивает почти двукратное увеличение быстродействия системы по сравнению с градиентным методом;

7. Установлено, что поляризационные свойства излучения взаимно некогерентных лазеров не оказывают существенного влияния на качественные или количественные характеристики системы;
8. Определена критическая величина шумовых воздействий, при которых предложенная система угловой коррекции излучения трёх взаимно некогерентных лазеров сохраняет свою работоспособность и обеспечивает адаптацию с требуемым качеством. Для исследованной в диссертации системы коррекции критическая величина шумового воздействия соответствует отношению сигнал/шум равному 11.5 дБ.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Адаптивное управление лучевыми потоками многопучкового лазера. // VII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана». Материалы симпозиума. Под общей редакцией М.В. Панченко, Г.П. Коханенко. - Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2000, с. 60.
2. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Адаптивное управление лучевыми потоками многопучкового лазера // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 10. с. 954-958.
3. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Влияние параметров оптики на адаптивное управление многопучковым лазером [Электронный ресурс]: Тез. докл. «Конференция молодых учёных, посвященная 10-летию ИВТ СО РАН», Новосибирск, 25-26 декабря 2000 г. - Режим доступа: [http://www.ict.nsc.ru/ws/show\\_abstract.dhtml?ru+9+1201](http://www.ict.nsc.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+9+1201)

4. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Влияние параметров оптики на адаптивное управление многопучковым лазером: Тез. докл. Юбилейная науч.-техн. конф. «Автоматика и электронное приборостроение». Казань, 2001. - Казань: КГТУ(КАИ), 2001. - с. 107-108.
5. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Особенности адаптивной коррекции излучения многопучковых лазеров // Вестник КГТУ. 2002. № 3. с. 17-20.
6. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Влияние поляризации излучения на работу адаптивной оптической системы многопучкового лазера: Электронное приборостроение. Научно-практический сборник. Выпуск 4 (25). Казань: КГТУ (КАИ), НИО «САН». 2002. с. 94-102.
7. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Адаптивная коррекция лучевых потоков нескольких лазеров // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т 15. №12. с. 1084-1087.
8. *V.I.Voronov, V.V.Trofimov* «Adaptive correction of beams from several lasers» // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics/ IX Joint International Symposium, July 2\*5, 2002, Материалы Симпозиума. - Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2002, с. 69.
9. *V.I.Voronov, V.V.Trofimov* «Numerical analysis of angular correction system for several laser beams propagating through a turbulent atmosphere» // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics/ X Joint International Symposium, June 24 - 28, 2003, Материалы Симпозиума. - Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2003, с. 74.

---

Формат 60-84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16. Усл. кр.-отт. 1,21. Уч.-изд.л. 1,0.

Тираж 100. Заказ 245.

---

Типография Издательства Казанского государственного

Технического университета

420111, Казань, К.Маркса, 10