

В.И. Воронов, В.В. Трофимов

Адаптивная коррекция лучевых потоков нескольких лазеров*Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева*

Поступила в редакцию 2.07.2002 г.

Представлены результаты анализа адаптивной системы коррекции излучения нескольких взаимно некогерентных лазеров. Проведены исследования различных алгоритмов адаптивной коррекции. Показано, что характер алгоритма и его параметры существенно влияют на поведение системы и за счет их надлежащего выбора возможно значительное увеличение быстродействия системы адаптивной коррекции.

Введение

Применение адаптивных оптических систем (АОС) для фокусировки излучения многопучковых лазеров представляется перспективным в устройствах, формирующих лазерное излучение с заданным распределением амплитуды поля или интенсивности в некоторой области пространства. Примерами многопучковых лазеров могут служить многоканальные лазеры [1, 2], представляющие собой сборку из нескольких параллельно расположенных волноводных трубок; лазер «Юпитер» [3], имеющий коаксиальную конструкцию разрядной камеры и генерирующий излучение в виде пучков многоходовых мод (М-мод), а также решетки полупроводниковых лазеров [4]. Многопучковые лазеры находят применение в оптической астрономии, в системах передачи световой энергии на далекие расстояния, а также в открытых лазерных каналах связи. Иллюстрацией применения подобных систем для атмосферных оптических линий связи являются «лазерные мосты» фирмы «MicroMax Computer Intelligence, Inc.» [5]. Эти системы, с источником лазерного излучения в виде набора из нескольких полупроводниковых лазеров, используются в крупных населенных пунктах, испытывающих непрерывный рост потребностей в новых видах телекоммуникационных услуг и при отсутствии возможности применения по каким-либо причинам волоконно-оптических линий.

Вместе с тем практическое применение многопучкового лазерного излучения в системах связи существенно ограничивается из-за влияния атмосферной турбулентности. Такое влияние проявляется в амплитудно-фазовых искажениях, уменьшении когерентности излучения и случайных угловых флуктуациях лазерных пучков. В этих условиях весьма актуальной оказывается проблема юстировки пучков на приемное устройство и удержания их на апертуре приемника. Указанные обстоятельства приводят к необходимости использования адаптивных оптических систем юстировки, являющихся, по сути дела, системами угловой коррекции излучения.

Характеристики одной из подобных систем, предназначенной для коррекции волновых фронтов лазера «Юпитер», были рассмотрены в работах [6, 7], в которых представлены результаты численного моделирования лазера, а также показано влияние параметров оптики измерительно-управляющего канала и поляризации излучения на работу

АОС. В указанных работах исследования проводились с учетом когерентных свойств М-мод лазера «Юпитер».

Поиск путей улучшения характеристик реальных устройств за счет применения АОС в системах типа «лазерный мост» выявил необходимость проведения дополнительных исследований. Их актуальность обусловлена тем, что в этих системах лазерные пучки не являются взаимно когерентными. Поэтому результаты, полученные для когерентных систем, напрямую не могут быть распространены на многопучковые «лазерные мосты».

В настоящей статье изучается функционирование адаптивной оптической системы, предназначенной для коррекции углового положения пучков нескольких взаимно некогерентных лазеров.

Математическая модель

В принятой модели адаптивной системы качество коррекции оценивается стандартным образом – по величине функционала фокусировки J_d для излучения, прошедшего через диафрагму измерительно-управляющего канала [8].

Как известно, в этом случае функционал фокусировки определяется соотношением

$$J_d = P/P_0, \quad (1)$$

где P – мощность излучения, прошедшего измерительную диафрагму, P_0 – мощность излучения, проходящего через эту же диафрагму при идеальной коррекции, т.е. когда все пучки сведены в ее центр.

Следует отметить, что в рассматриваемых «лазерных мостах» в качестве диафрагмы следует принимать апертуру приемного устройства. Однако при моделировании можно ограничиться случаем расположения диафрагмы в фокусе идеальной линзы, находящейся вблизи источника излучения, поскольку характер распределений поля в фокусе и в дальней зоне одинаков. Разумеется, такая замена справедлива для пучков, распространяющихся в атмосфере, воздействующей только на их угловые параметры. При проведении анализа также предполагается, что влияние атмосферной турбулентности на амплитудные параметры пучков незначительно и им можно пренебречь. Указанные предположения соответствуют случаю слабо возмущенной

атмосферы и, соответственно, слабых флуктуаций параметров принимаемого сигнала, когда профиль пучка отличается достаточно высокой степенью однородности [9].

Обычно считается, что излучение хорошо скорректировано, когда $J_d \geq 0,8$ [8]. В процессе работы адаптивной системы функционал фокусировки оценивается на каждом шаге адаптации, и волновой фронт корректируется так, чтобы J_d удовлетворяло указанному условию.

В анализируемой модели предполагается, что распределение амплитуды A_j в сечении каждого пучка в плоскости диафрагмы гауссово и одинаково для всех пучков:

$$A_j = \exp[-(r_j/W)^2], \quad (2)$$

где W – радиус сечения каждого пучка; r_j – текущая радиальная координата пучка в системе, связанной с его центром; j – номер пучка ($j = 1, 2, 3$).

Энергетические параметры пучков в плоскости диафрагмы будем анализировать в системе с началом координат, совпадающим с центром диафрагмы. Число лазеров, входящих в систему, примем равным трем, поскольку именно такое количество характерно для существующих «лазерных мостов», в частности мостов фирмы «MicroMax».

Возмущающие воздействия приводят к случайному расположению пучков. Расстояние от центра каждого пучка до центра диафрагмы обозначим R_j , а его положение в принятой системе координат будем характеризовать углом Ψ_j . В этом случае формула для мощности излучения пучков трех взаимно некогерентных лазеров в пределах диафрагмы может быть записана в виде

$$P \approx \int_0^a \int_0^{2\pi} \sum_{j=1}^3 |A_j(R_j, \Psi_j, r, \psi)|^2 r dr d\psi, \quad (3)$$

где a – радиус диафрагмы; r и ψ – текущие радиальная и угловая координаты. Величина P_0 определяется этой же формулой, но при $R_j = 0$.

Для выбора эффективного алгоритма коррекции необходимо определить поведение функционала фокусировки при различных вариантах управления. В многопучковых системах возможны два варианта: «последовательный» и «параллельный» [6]. В первом случае каждый последующий пучок сводится в центр диафрагмы только после того, как управление предыдущим пучком обеспечит достижение наибольшего (текущего) значения J_d . В случае «параллельного» варианта управляющее воздействие для каждого пучка вычисляется только для одного шага, а затем осуществляется переход к управлению следующим пучком. Предполагается, что коррекция осуществляется за достаточно малый промежуток времени, в течение которого атмосферные возмущения не меняют положений пучков. В процессе работы в каждый момент времени корректируется положение только одного пучка, управление остальными пучками не производится.

Для оценки свойств функционала фокусировки была разработана программа, определяющая значение J_d при принудительном изменении R_j . Вычисления производились при следующих параметрах системы: радиус пучка в плоскости диафрагмы $W = 0,3$ мм, длина волны излучения лазера $\lambda = 10,6$ мкм, радиус диафрагмы $a = 0,2$ мм.

Результаты расчетов представлены на рис. 1. График построен для случая «последовательного» управления,

когда первоначально пучки расположены в плоскости диафрагмы случайным образом вдоль одной из координат. Для упрощения анализа изменение R_j также осуществлялось вдоль этой координаты с шагом, одинаковым для всех пучков. В этом случае поведение J_d удобно анализировать в зависимости от номера шага k , что и показано на рис. 1.

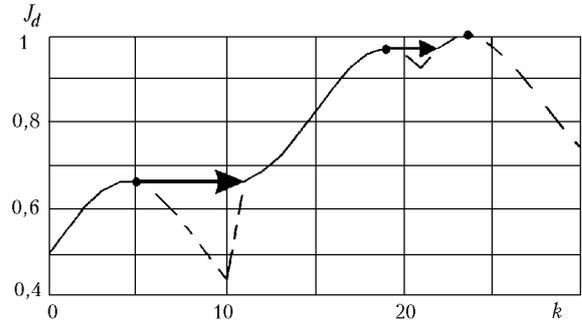


Рис. 1. Зависимость функционала фокусировки J_d от номера шага k

Заметим, что изменение R_{j+1} для каждого последующего ($j + 1$) пучка начиналось после «установки» предыдущего пучка в положение, соответствующее локальному максимуму J_d . В связи с этим утолщенными линиями на рис. 1 отмечены моменты перехода к управлению следующим пучком, а пунктирными – поведение J_d после прохождения каждым пучком «своего» максимума.

Из рис. 1 следует, что зависимость J_d от положения каждого пучка является достаточно гладкой функцией и имеет один глобальный максимум. Такая зависимость функционала фокусировки дает возможность использовать для угловой коррекции не только часто применяемый градиентный метод, но и метод Ньютона, поскольку, как известно [10], последний метод является одним из самых быстрых, но дает хорошие результаты только для гладких функций.

Результаты численного моделирования адаптивной системы

Чтобы оценить эффективность «последовательного» и «параллельного» алгоритмов управления, работа системы адаптивной коррекции анализировалась при использовании для каждого алгоритма обоих методов – градиентного метода и метода Ньютона.

В градиентном методе максимум функционала фокусировки находится путем последовательного сравнения значений $J_d(u_k)$ и $J_d(u_{k+1})$ при управляющих воздействиях u_k и u_{k+1} , определяемых в ходе итерационной процедуры [10]:

$$u_{k+1} = u_k - \alpha J'_d, \quad (4)$$

где $\alpha = \text{const}$ – параметр градиентного метода; k – номер итерации ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Моделирование процесса коррекции производилось при параметрах системы и пучков, указанных в предыдущем разделе. Численные эксперименты показали, что в этом случае лучшие результаты достигаются при значении $\alpha = 0,1$. Точность градиентного метода, по достижении которой процесс адаптации завершался, задавалась значением $\varepsilon = 0,01$.

На рис. 2 представлены зависимости функционала фокусировки от номера шага k в процессе адаптации, осуществ-

ляемой «последовательным» и «параллельным» алгоритмами. Оба алгоритма основаны на градиентном методе. В первом случае для завершения адаптации при значении $J_d = 0,958$ потребовалось 36 итераций, во втором случае – 58 итераций, при этом J_d увеличился только до 0,874.

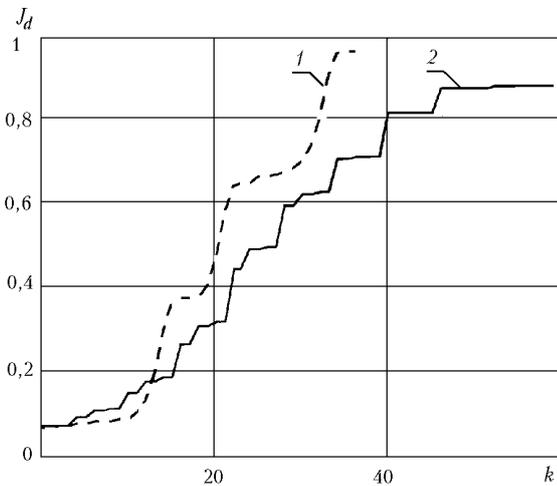


Рис. 2. Изменение функционала фокусировки в процессе адаптации градиентным методом: зависимость 1 соответствует «последовательному», 2 – «параллельному» алгоритму управления

В методе Ньютона точка экстремума функции $J_d(u_k)$ определяется по алгоритму [10]:

$$u_{k+1} = u_k - \beta (J'_d / J''_d), \quad (5)$$

где $\beta = \text{const}$ – параметр метода Ньютона.

Моделирование работы АОС осуществлялось при тех же параметрах системы и пучков, что и для градиентного метода. Для параметра метода Ньютона было принято значение $\beta = -0,4$. Расчеты показывают, что при этом обеспечиваются лучшие характеристики адаптации. Результаты численного анализа представлены на рис. 3.

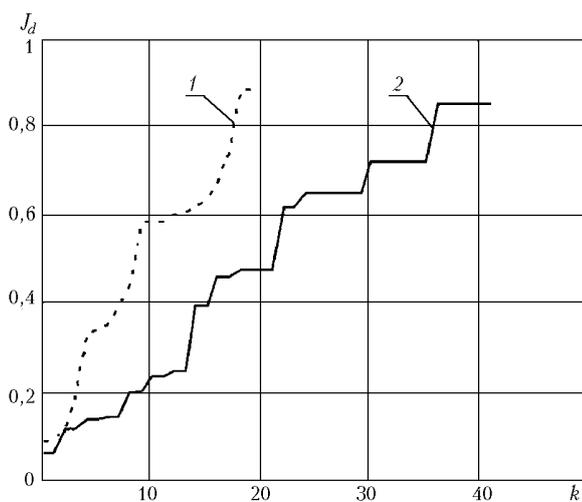


Рис. 3. Изменение функционала фокусировки в процессе адаптации методом Ньютона: зависимость 1 соответствует «последовательному», 2 – «параллельному» алгоритму управления

При «последовательном» алгоритме адаптация завершается за 19 итераций, и по окончании адаптации функционал фокусировки достигает значения $J_d = 0,851$ за 41 итерацию, т.е. «последовательный» алгоритм и в этом случае является более быстродействующим при более высоком качестве коррекции. Таким образом, «последовательный» алгоритм при использовании обоих методов (градиентного и метода Ньютона) предпочтительнее, чем «параллельный».

Полученный результат можно объяснить следующей особенностью работы АОС: радиальное перемещение каждого пучка, характерное для «последовательного» алгоритма, обеспечивает в среднем более крутую зависимость J_d от величины управляющего воздействия, чем это имеет место при «параллельном» алгоритме, в котором пучки стягиваются к центру диафрагмы в среднем по спирали. В свою очередь, большая крутизна изменения J_d позволяет более точно определить положение максимума функционала фокусировки в процессе коррекции.

В связи с тем что в реальных АОС необходим наиболее эффективный метод, представляет интерес сравнительная оценка быстродействия алгоритмов, основанных на градиентном методе и методе Ньютона. На рис. 4 представлены изменения функционала фокусировки в процессе адаптации, осуществляемой двумя вышеуказанными методами при «последовательном» алгоритме управления.

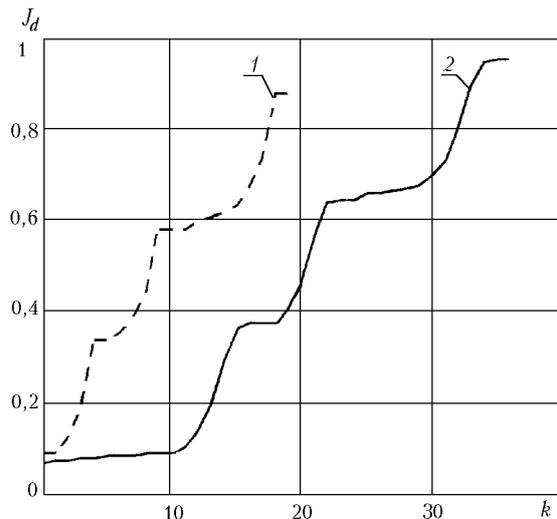


Рис. 4. Сравнительные характеристики методов в процессе адаптации «последовательным» алгоритмом: кривая 1 соответствует методу Ньютона, 2 – градиентному методу

Результаты, представленные на рис. 4, со всей очевидностью свидетельствуют, что при указанных параметрах АОС использование «последовательного» алгоритма управления, основанного на методе Ньютона, дает возможность почти в два раза увеличить скорость адаптивной коррекции по сравнению с алгоритмом, основанным на градиентном методе.

Заключение

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Для рассмотренных в работе условий функционирования адаптивной системы «последовательный» алго-

ритм управления является более эффективным, чем «параллельный», и обеспечивает большее быстродействие при более высоком качестве угловой коррекции лазерных пучков.

2. Зависимость функционала фокусировки от переменных управления для нескольких взаимно некогерентных лазеров является достаточно гладкой функцией, что дает возможность использовать для угловой коррекции пучков как градиентный метод, так и метод Ньютона.

3. Алгоритм, основанный на методе Ньютона, позволяет почти в два раза увеличить быстродействие системы по сравнению с алгоритмом, использующим градиентный метод.

1. *Васильцов В.Н.* Многоканальные промышленные CO₂-лазеры // Изв. РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. № 12. С. 150–159.
2. *Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А.* Мощный многолучевой газоразрядный лазер непрерывного действия // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. № 3. С. 129–132.
3. *Воронов В.И., Большаков С.С., Ляпахин А.Б., Польский Ю.Е., Ситенков Ю.Л., Урываев В.Е., Хохлов Ю.М.* CO₂-лазер с ак-

тивным объемом кольцевого сечения // Приборы и техн. эксперим. 1993. № 3. С. 162–167.

4. *Кандидов В.П., Леванова И.Г.* Цилиндрический резонатор Тальбо // Квант. электрон. 1995. Т. 22. № 1. С. 93–94.

5. *Web-сайт* фирмы «MicroMax Computer Intelligence, Inc.» / <http://www.micromax.com>

6. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Адаптивное управление лучевыми потоками многопучкового лазера // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 10. С. 954–958.

7. *Воронов В.И., Трофимов В.В.* Влияние поляризации излучения на работу адаптивной оптической системы многопучкового лазера // Электронное приборостроение: Научно-практ. сб. Вып. 4(25). Казань: КГТУ, НИО «САН», 2002. С. 94–102.

8. *Тараненко В.Г., Шанин О.И.* Адаптивная оптика. М.: Радио и связь, 1990. 112 с.

9. *Арсеньян Т.И., Зотов А.М., Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В.* Характеристики лазерных пучков в условиях перемежаемости мелкомасштабной атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 10. С. 894–899.

10. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач: Уч. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 552 с.

V.I. Voronov, V.V. Trofimov. Adaptive correction of beams from several lasers.

An adaptive system for correction of radiation from several mutually incoherent lasers is analyzed. Different adaptive correction algorithms are studied. It is shown that the character of an algorithm and its parameters significantly affect the system behavior, and the speed of the adaptive correction system can be considerably increased due to the proper selection of the algorithm and its parameters.