

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. – 250 с.
2. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 335 с.
3. Вохник О.М., Спажкин В.А., Терентьева И.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик твердотельного лазера с ВРМБ-зеркалом // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 3. – С. 393–396.
4. Высотина Н.В., Розанов Н.Н., Семенов В.Е., Смирнов В.А. Амплитудно-фазовая адаптация на протяженных неоднородных трассах с помощью гибких зеркал // Известия вузов. Физика. – 1985. – Т. 28. – № 11. – С. 42–50.
5. Hu Shijie, Xu Bing, Zhang Xuejun, Hou Jing, Wu Jian, Jiang Wenhan. Double-deformable-mirror adaptive optics system for phase compensation // Applied Optics. – 2006. – V. 45. – № 12/20. – P. 214–221.
6. Barchers J.D. Evaluation of the impact of finite-resolution effects on scintillation compensation using two deformable mirrors // Journal of Optical Society of America. A. – 2001. – V. 18. – № 12. – P. 3098–3109.
7. Roggermann M.C., Lee J.L. Two-deformable-mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere // Applied Optics. – 1998. – V. 37. – № 21. – P. 4577–4586.
8. Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova N.A. Principal limitations of phase conjugation algorithm and amplitude-phase control in two-mirror adaptive optics system // Proc. SPIE. – 2002. – V. 5026. – P. 127–134.
9. Егоров К.Д., Кандидов В.П., Чесноков С.С. Численное исследование распространения интенсивного лазерного излучения в атмосфере // Известия вузов. Физика. – 1983. – Т. 26. – № 2. – С. 66–79.
10. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А. Принципиальные ограничения алгоритма фазового сопряжения и реализация амплитудно-фазового управления в двухзеркальной адаптивной системе // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15. – № 12. – С. 1073–1077.

Поступила 20.03.2009 г.

УДК 535.211

## АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ. Ч. 2. ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОТ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ

Ф.Ю. Канев, Н.А. Макенова\*, Т.Е. Хохлова\*, Е.А. Цыро\*\*

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: kanev@yandex.ru

\*Томский политехнический университет

E-mail: mna@iao.ru

\*\*Томский государственный университет

E-mail: mna@iao.ru

*В численных экспериментах получены оценки эффективности использования амплитудно-фазового управления лазерным пучком для компенсации тепловых и турбулентных искажений излучения. Проведено сравнение адаптивных систем, работающих на основе алгоритма обращения волнового фронта с системами фазового сопряжения. Показано, что при недостаточном быстродействии управления качество компенсации искажений падает. Требования к быстродействию системы могут быть снижены при смещении канала распространения опорного излучения в сторону, противоположную направлению потока в среде (в наветренную сторону).*

### Ключевые слова:

*Обращение волнового фронта, системы амплитудно-фазового управления излучением, атмосферная турбулентность, тепловое самовоздействие лазерных пучков.*

### 1. Коррекция атмосферных искажений пучков с использованием алгоритма амплитудно-фазового управления

В первой части данной статьи был рассмотрен алгоритм формирования требуемого амплитудного распределения лазерного излучения при управлении его фазой [1]. Также было показано, что на основе алгоритма возможно построение адаптивной системы амплитудно-фазового управления, предназначенной для коррекции атмосферных искажений.

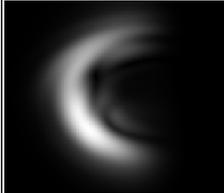
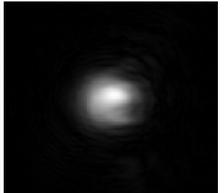
Во второй части на основе методов численного эксперимента проводится анализ коррекции атмосферных искажений лазерных пучков в идеальной

адаптивной системе, в которой управление осуществляется без учета временных и пространственных ограничений характерных для реальной установки. Затем с целью приближения математической модели к реальной системе в нее вводится блок, учитывающий смещение неоднородностей показателя преломления в атмосфере за счет поперечного пучку потока. В этом случае проявляется зависимость эффективности коррекции искажений от быстродействия управления, характер которой рассматривается в настоящей работе. Для увеличения эффективности предлагается выполнить смещение канала опорного излучения в наветренную сторону.

Количественные данные, характеризующие управление пучком в идеальной адаптивной системе при обращении волнового фронта с помощью двух зеркал представлены на рис. 1. На рисунке помещены зависимости критерия фокусировки от интенсивности искажений, характеризуемой радиусом Фрида  $r_0$ , полученные при управлении в двухзеркальной адаптивной системе (кривая 3), при фазовом сопряжении (кривая 2) и для коллимированного пучка в отсутствие коррекции (кривая 1). Использование амплитудно-фазовой коррекции позволяет получить во всей области изменения  $r_0$  практически постоянные значения критерия фокусировки, соответствующие коллимированному пучку, распространяющемуся в среде без искажений, при фазовом сопряжении значения  $J$  уменьшаются с ростом интенсивности турбулентности. Для минимально допустимого для расчетной сетки значения  $r_0$  двухзеркальная система обеспечивает увеличение эффективности в 1,8 раза по сравнению с фазовым сопряжением (рис. 1, б, усредненные результаты), для отдельных реализаций это отличие может достигать 5...6 раз (рис. 1, а, сравнение кривых 2 и 3).

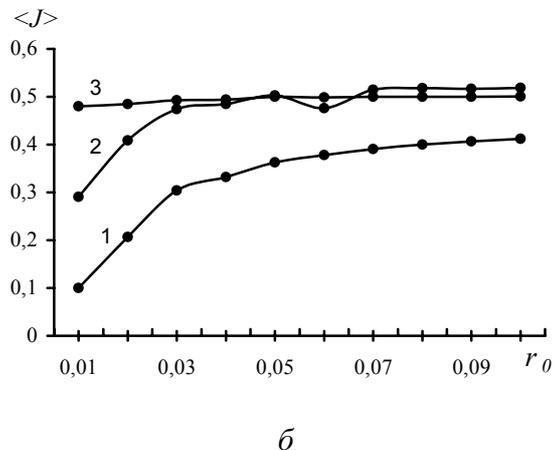
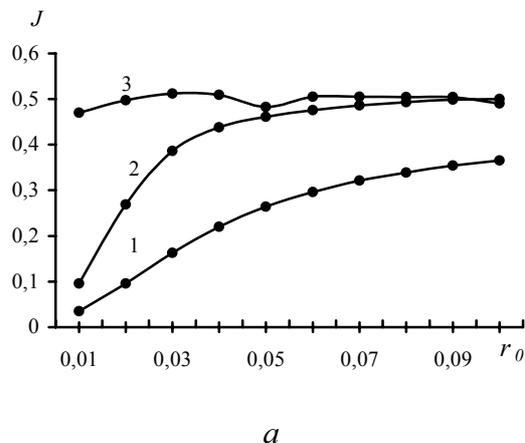
Устойчиво работает система амплитудно-фазового управления и в условиях теплового самовоздействия. Качественно процесс коррекции иллюстрируется данными таблицы, где показано, что при умеренной мощности излучения ( $R_V = -30$ ) в плоскости наблюдения формируется пучок с распределением интенсивности, совпадающим с гауссовским профилем опорного излучения, т. е. компенсация искажений является полной. С увеличением мощности ( $R_V = -50$ ) наблюдается незначительное отклонение результирующего распределения от опорного (остается некоторая «изрезанность»), но и в этом случае большая часть энергии сосредоточена в малой области, находящейся на оси распространения излучения.

**Таблица.** Результат использования алгоритма амплитудно-фазового управления для коррекции теплового самовоздействия

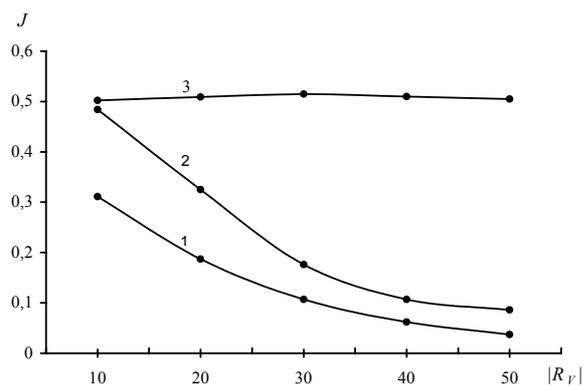
Параметр нелинейности	Пучок без коррекции	Результат коррекции
$R_V = -30$		
$R_V = -50$		

Данные, количественно характеризующие компенсацию самовоздействия, приведены на рис. 2, где помещены значения критерия фокусировки, полученные при использовании амплитудно-фазового управления, фазового сопряжения и для системы с разомкнутой обратной связью (без управления). В двухзеркальной системе во всем рассмотренном диапазоне изменений параметра нелинейности (при  $|R_V|$  от 10 до 50) критерий фокусировки остается равным 0,5 – значению, получаемому для коллимированного пучка (так как в качестве опорного был взят коллимированный пучок, то больших значений критерия получить принципиально невозможно).

Значительно меньшая эффективность наблюдается при фазовом сопряжении, для которого значение критерия уменьшается от 0,49 до 0,1. Можно заключить, что для пучков высокой интенсивности ( $|R_V| = 50$ ) амплитудно-фазовое управление позволяет получить увеличение эффективности коррекции в 5 раз по сравнению с фазовым сопряжением.



**Рис. 1.** Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности от интенсивности искажений для одной из реализаций (а) и при усреднении по 50 реализациям,  $Z=0,5$ . Кривые: 1) система без управления; 2) фазовое сопряжение; 3) идеальная система ОВФ



**Рис. 2.** Компенсация теплового самовоздействия с использованием двухзеркальной системы,  $Z=0,5$ . Кривые: 1) система без управления; 2) фазовое сопряжение; 3) идеальная система ОВФ

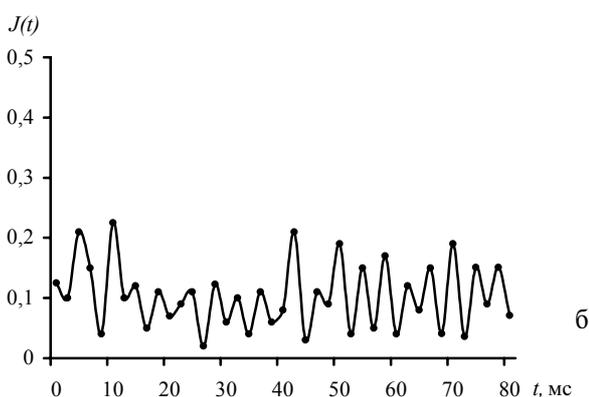
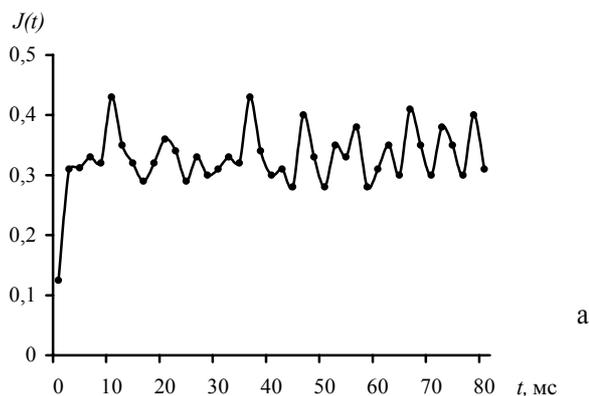
### 2. Зависимость эффективности адаптивного управления от быстродействия системы

Все приведенные выше данные были получены в предположении, что рассматриваемая система является идеальной, при моделировании не учитывалось влияние ограничений, вносимых отдельными элементами, бесконечно малым являлось время регистрации и обработки данных.

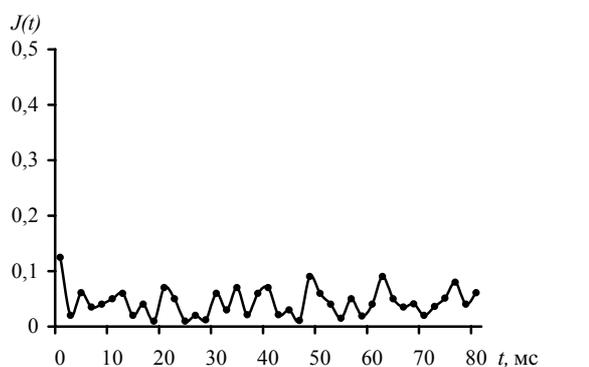
С целью приближения модели к реальной установке было учтено конечное время срабатывания системы, в течение которого неоднородности на трассе распространения успевают сместиться относительно канала распространения излучения (полагалось, что поток среды направлен перпендикулярно трассе распространения пучка). В данной статье приведены результаты, при получении которых варьруемыми параметрами численных экспериментов являлись время запаздывания и интенсивность турбулентных искажений, характеризующая радиусом Фрида  $r_0$ .

Рис. 3 показывает, как изменяется критерий фокусировки в процессе адаптивного управления при различном времени запаздывания, которое здесь увеличивалось более чем в два раза – от 40 мс (рис. 3, а) до 100 мс (рис. 3, б). Из рисунка видно, что в рассматриваемых численных экспериментах регистрируются осцилляции критерия фокусировки в процессе коррекции искажений и уменьшение среднего значения этого параметра с ростом времени запаздывания. В рассмотренном диапазоне времен среднее значение  $J(t)$  уменьшилось с 0,33 до 0,09.

При конечном быстродействии эффективность коррекции зависит также и от интенсивности турбулентных искажений, что иллюстрируется на рис. 4, при получении которого радиус Фрида был уменьшен до 0,015, время запаздывания (40 мс) не изменялось относительно рис. 3, а. Среднее значение критерия фокусировки теперь равно 0,05, тогда как в предыдущем случае было зарегистрировано значение  $\langle J \rangle = 0,33$  ( $r_0 = 0,06$ , рис. 3, а), т. е. снижение эффективности было значительным.



**Рис. 3.** Динамика изменения критерия фокусировки при адаптивном управлении. Параметры задачи: радиус Фрида  $r_0=0,060$ , начальный радиус пучка 10 см, скорость ветра 4 м/с. Время запаздывания системы и среднее значение критерия фокусировки  $t=40$  мс,  $\langle J \rangle = 0,33$  (а);  $t=100$  мс,  $\langle J \rangle = 0,09$  (б)



**Рис. 4.** Увеличение интенсивности турбулентных искажений. Время запаздывания  $t=40$  мс, радиус Фрида  $r_0=0,015$ . Среднее значение  $\langle J \rangle = 0,05$

### б. Смещение канала опорного излучения в наветренную сторону: возможность повышения эффективности системы без увеличения ее быстродействия

Результаты предыдущего раздела статьи позволяют заключить, что качество коррекции искажений в реальной атмосфере в значительной степени зависит от быстродействия адаптивной системы. Отметим, что повышение быстродействия является

инженерной задачей, решению которой в настоящее время уделяется большое внимание. В качестве примера можно привести ряд публикаций, в которых рассматривается возможность увеличения скорости регистрации фазового профиля датчиком Гартмана. Обычно прибор работает на частоте 30 Гц, что недостаточно для обеспечения компенсации турбулентных флуктуаций показателя преломления [2], поэтому была разработана конструкция датчика, рабочая частота которого составляет около 1000 Гц [3]. Наряду с улучшением характеристик элементов проводятся исследования по оптимизации алгоритма коррекции, направленные на повышение быстродействия [4].

В настоящей статье предлагается еще один вариант решения проблемы, в котором повышение эффективности достигается при изменении геометрии системы, а именно за счет смещения оси опорного излучения в наветренную сторону относительно корректируемого пучка. Схематически ход лучей для рассматриваемой геометрии трассы показан на рис. 5.



Рис. 5. Смещение опорного излучения относительно корректируемого пучка в адаптивной системе

Уменьшение эффективности управления при недостаточном быстродействии можно объяснить следующим образом. В адаптивной системе опорное излучение несет информацию о неоднородностях показателя преломления на трассе, с использованием которой в алгоритме управления вычисляются амплитудный и фазовый профили корректируемого пучка. Но если система «медленная», за время регистрации и формирования излучения информация о неоднородностях «устаревает» и параметры пучка на входе в среду уже не соответствуют ситуации на трассе. Из-за этого несоответствия снижается эффективность коррекции искажений.

Использование гипотезы о том, что вариации показателя преломления в атмосфере переносятся ветром без значительных изменений («замороженная» турбулентность), позволяет решить проблему управления, сдвинув опорный пучок в направлении, противоположном вектору движения среды. Правильный выбор смещения обеспечивает то, что распределение амплитуды и фазы корректируемого пучка будет соответствовать характеристикам среды на трассе распространения.

Для иллюстрации использования предложенной методики нами была проведена серия численных экспериментов, в которых варьировались интенсивность турбулентности, быстродействие си-

стемы и величина смещения опорного излучения. Результаты, полученные для системы с временем запаздывания 40 мс, работающей в турбулентной атмосфере с  $r_0=0,015$  при скорости ветра 4 м/с, представлены на рис. 6. Смещение опорного пучка  $\Delta$ , выраженное в начальных радиусах, было равно 2. Подобные численные эксперименты также проводились для  $\Delta=1$  и 3; средние значения  $J(t)$  для  $\Delta=1$  составили 0,34, а для  $\Delta=3$  — 0,35.

Во всех рассмотренных примерах критерий фокусировки испытывал значительные осцилляции, введение смещения практически не влияло на их амплитуду. В то же время средние значения  $J$  увеличивались с увеличением смещения, достигали максимума при  $\Delta=2$ , затем уменьшались. Таким образом, смещение опорного излучения действительно приводит к увеличению эффективности адаптивной системы. Этот вывод был проверен и при других значениях времени запаздывания, при вариациях интенсивности турбулентности и скорости ветра (данные здесь не приводятся). Во всех численных экспериментах были зарегистрированы максимум критерия фокусировки  $J$  и уменьшение его значений при увеличении  $\Delta$ , т. е. при смещении пучка в наветренную сторону наблюдалось увеличение эффективности коррекции атмосферных искажений, достигаемое без увеличения быстродействия адаптивной системы.

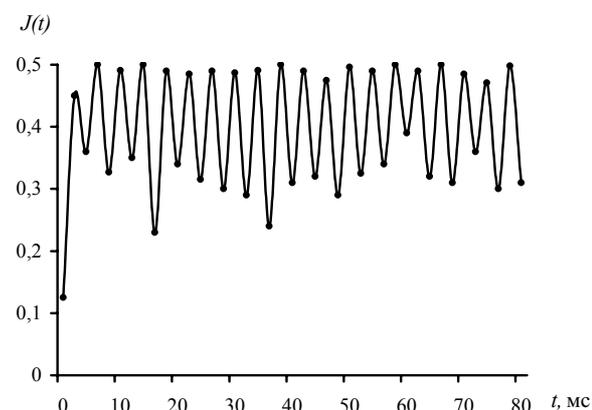


Рис. 6. График зависимости критерия фокусировки от времени. Время запаздывания  $t=40$  мс,  $\Delta=2$ , радиус Фрида  $r_0=0,015$ . Среднее значение  $\langle J \rangle=0,43$

### Заключение

Рассмотрена адаптивная система амплитудно-фазового управления лазерным пучком. Показано, что использование алгоритма обращения волнового фронта, реализованного с использованием двух идеальных управляемых зеркал, позволяет получить в плоскости наблюдения лазерный пучок, практически свободный от искажений, в системе достигается полная компенсация атмосферного воздействия на излучение. Эффективность коррекции практически не зависит от параметров среды.

Учет свойств, характерных для реальной системы, в частности, конечного быстродействия, при-

водит к уменьшению качества компенсации, которое также наблюдается при увеличении интенсивности искажений.

Увеличение эффективности без повышения быстродействия управления может быть получено при смещении опорного пучка в наветренную сторону.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канев Ф.Ю., Макенова Н.А., Пустынников С.В., Цыро Е.А. Амплитудно-фазовое управление лазерным пучком. Ч. 1. Формирование амплитудного распределения // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 115–119.
2. Samarkin V., Aleksandrov A., Kudryashov A. Novel wavefront correctors based on bimorph elements // Proc. of the 3-rd Intern. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. – Beijing, China, 2002. – P. 171–178.
3. De Lima Montero D.W., Vdovin G., Sarro M. Integration of a Hartmann-Shack wavefront sensor // Proc. of the 2-nd Intern. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. – Durham, Great Britain, 1999. – P. 215–220.
4. Малафеева И.В., Тельпуховский И.Е., Чесноков С.С. Симплекс-метод в задаче динамической коррекции теплового самовоздействия световых пучков при флуктуациях параметров среды на трассе // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5. – № 12. – С. 1241–1251.

Поступила 20.03.2009 г.

УДК 621.385.69

### КОАКСИАЛЬНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ ТРИОД С РАДИАЛЬНО-РАСХОДЯЩИМСЯ ПУЧКОМ

В.П. Григорьев, Т.В. Коваль, Г.В. Мельников, Р.Р. Рахматуллин

Томский политехнический университет  
E-mail: grig@am.tpu.ru

*Рассмотрено стационарное состояние электронного потока и формирование виртуального катода в коаксиальном отражательном триоде с радиально расходящимся пучком в широком диапазоне ускоряющих напряжений. Проведено моделирование формирования виртуального катода методом крупных частиц. Получена зависимость инкремента возбуждаемых колебаний и эффективности излучения от геометрии диода, внешнего напряжения и импеданса резонансной камеры. Показано, что в коаксиальном триоде наибольший инкремент взаимодействия пучка имеет место с волной TEM типа. Определена область геометрических размеров коаксиальной системы, где может осуществляться наиболее эффективное возбуждение электромагнитных колебаний на TEM моде.*

#### Ключевые слова:

Коаксиальный диод, отражательный триод, виртуальный катод, поле пространственного заряда, электронный пучок.

Отражательные триоды с виртуальным катодом (ВК) являются генераторами микроволнового излучения в сантиметровом диапазоне частот и уровнем мощности десятки мегаватт. Одним из достоинств является возможность использования всего тока пучка, что обеспечивает получение высокого уровня мощности излучения в таких генераторах. Эти приборы отличаются конструктивной простотой, компактностью и отсутствием внешнего магнитного поля [1]. Все это определяет повышенный интерес к таким системам.

Наиболее полно указанные преимущества могут быть реализованы в триодах коаксиального типа. На возможность генерации в таких системах с радиально сходящимся пучком было указано в теоретических [2] и экспериментальных [3] работах, хотя полученная мощность излучения была сравнительно не высока (до 120 МВт). Достигнутый уровень мощности объяснялся далеко не оптимальными параметрами системы. Как показывают исследования стационарных состояний коаксиальных триодов различной геометрии [4] более пред-

почтительно использовать триоды с расходящимся электронным пучком. Весьма привлекательной представляется возможность генерации в таких приборах бездисперсионной TEM-моды, для которой можно эффективно использовать согласующие элементы, рассчитанные на узкую полосу частот.

В данной работе исследуется стационарное состояние электронов и возбуждение электромагнитных колебаний в коаксиальном отражательном триоде с радиально расходящимся электронным пучком.

#### Стационарное состояние электронов в коаксиальном отражательном триоде

В литературе вопросы стационарных состояний коаксиальных диодов наиболее полно рассмотрены для нерелятивистских ускоряющих напряжений [5]. В существующих работах полностью отсутствует анализ положения ВК, либо он проведен при постоянной энергии электрона, что является достаточно грубым приближением [7]. Нами про-