

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Н.А. Макенова, Е.И. Моисей

## Новый алгоритм формирования требуемого распределения амплитуды при управлении фазой. Повышение эффективности двухзеркальной адаптивной системы

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 5.07.2007 г.

Рассмотрена возможность коррекции тепловых и турбулентных искажений лазерного излучения на основе амплитудно-фазового управления, реализованного в двухзеркальной адаптивной системе. Предложен итерационный метод формирования требуемого распределения амплитуды корректируемого пучка на входе в искажающую среду при управлении его фазой в плоскости, находящейся на заданном расстоянии от выходной апертуры системы, выполнены оценки его точности. В численных экспериментах показано, что использование метода обеспечивает более высокую эффективность компенсации искажений по сравнению с алгоритмом фазового сопряжения.

### 1. Системы амплитудно-фазового управления излучением

Нарушение принципа оптической обратимости в адаптивных системах, построенных на основе алгоритма фазового сопряжения, не позволяет добиться полной компенсации искажающего воздействия на лазерное излучение протяженного слоя турбулентной атмосферы [1]. Для того чтобы искажения в плоскости наблюдения отсутствовали, на входе в среду необходимо сформировать пучок с распределением амплитуды, совпадающим с опорным излучением и с обратным, относительно опорного, фазовым профилем [2].

Выполнить указанную операцию можно по-разному. Например, можно использовать обращение волнового фронта опорного излучения в нелинейном кристалле, реализуемое на основе явления вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюэна (здесь кристалл — это, так называемое, ВРМБ-зеркало) [3]. Известные недостатки данного метода: наличие порогового значения мощности, при котором проявляется эффект ВРМБ; искажения, возникающие в нелинейном кристалле; потери, составляющие от 20 до 40% мощности излучения.

Свободными от таких недостатков, как порог и потери, являются системы амплитудно-фазового управления [4], в которых требуемое задание амплитудного распределения осуществляется при управлении фазой в плоскости, находящейся на некотором расстоянии от выходной апертуры.

Построению таких двухзеркальных систем уделяется большое внимание исследователями как в России [4], так и за рубежом [5–7], но, несмотря на обширную библиографию по данному вопросу, до на-

стоящего времени не решена основная проблема, касающаяся амплитудно-фазового управления с помощью двух зеркал. А именно: не найден алгоритм задания фазового распределения, обеспечивающий требуемое распределение амплитуды и полную коррекцию искажений. Здесь нужно указать, что авторы работ [6, 7] сообщают лишь о частичной коррекции искажающего воздействия атмосферы, а в [8] получена полная компенсация только для тонкого слоя турбулентной среды.

В настоящей статье описан итерационный алгоритм формирования требуемого распределения амплитуды, выполнены оценки его точности, приведены результаты компенсации турбулентных и тепловых искажений излучения с использованием разработанного алгоритма.

### 2. Характеристики пучка и среды

Распространение излучения в атмосфере описывалось параболическим уравнением, в котором учитывались тепловые и турбулентные изменения показателя преломления на трассе.

Нелинейные искажения излучения определялись безразмерным параметром  $R_v$ , называемым обычно параметром нелинейности [9]:

$$R_v = \frac{2k^2 a_0^3 \alpha I_0}{n_0 \rho C_p V} \frac{\partial n}{\partial T}, \quad (1)$$

где  $k$  — волновое число;  $I_0$  — плотность мощности на оси пучка в плоскости апертуры источника;  $a_0$  — начальный радиус пучка;  $V$  — скорость потока среды;  $\rho$  — плотность среды;  $C_p$  — теплоемкость при постоянном давлении;  $\alpha$  — коэффициент поглощения

воздуха;  $n_0$  – невозмущенное значение показателя преломления;  $T$  – температура.

Интенсивность турбулентных искажений определялась радиусом Фрида, связанным со структурной постоянной  $C_n^2$  известной формулой [2]:

$$r_0 = 1,68(C_n^2 k^2 L)^{-3/5}. \quad (2)$$

Для характеристики светового поля в плоскости наблюдения в системах передачи энергии использовался критерий фокусировки

$$J(t) = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x,y) I(x,y,t) dx dy, \quad (3)$$

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиуса  $S_t$ . В формуле (3)  $P_0$  – полная мощность излучения;  $\rho(x,y) = \exp(-(x^2 + y^2)/S_t^2)$  – апертурная функция.

Во всех численных экспериментах длина трассы  $Z$  была нормирована на дифракционную длину излучения  $Z_d = ka_0^2$ , где  $k$  – волновое число;  $r_0$  нормирован на начальный радиус пучка  $a_0$ .

### 3. Задание требуемого распределения амплитуды на входе в искажающую среду при управлении фазой

Возможность использования амплитудно-фазового управления, реализованного в двухзеркальной адаптивной системе, предназначенной для коррекции

атмосферных искажений пучков, рассматривалась в [10, 11], где представлены данные по компенсации возмущающего воздействия тонкого, по сравнению с длиной трассы, слоя среды (в численных экспериментах такой слой моделировался одним фазовым экраном). Для продолжения исследований по данной теме необходимыми являются описание алгоритма и краткое повторение основных результатов, полученных ранее.

Распространение опорного и корректируемого излучений («прямой пучок») в системе схематически показано на рис. 1.

Управление фазой осуществляется в плоскостях  $M1$  и  $M2$ , разделенных участком свободной дифракции  $Z_1$  (фактически плоскость  $M2$  является плоскостью выходной апертуры), на расстоянии  $Z_2$  от  $M2$  помещен искажающий экран.

Опорное излучение, в качестве которого использовался гауссовский пучок, распространяется от крайней правой плоскости в направлении адаптивной системы, проходит через экран, приобретая искажения, и падает на датчики, помещенные в  $M2$ , которые регистрируют его амплитудное и фазовое распределение. В результате компьютерной обработки полученных данных вычисляется фазовый профиль, присвоение которого излучению гауссовского профиля в плоскости  $M1$  обеспечивает требуемое распределение амплитуды корректируемого пучка на входе в искажающую среду. Вычисление фазы выполняется следующим образом. В специально построенной программе моделируется распространение опорного пучка с амплитудным распределением,

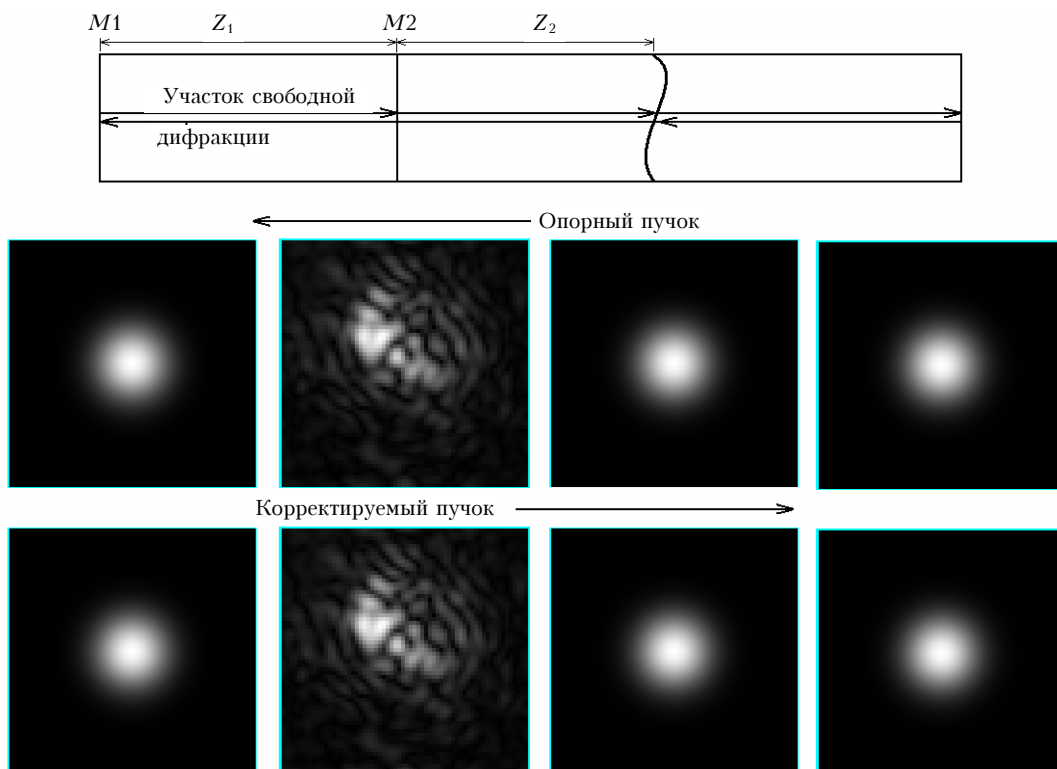


Рис. 1. Алгоритм амплитудно-фазового управления, предназначенный для компенсации тонкого, по сравнению с длиной трассы, слоя искажающей среды

регистрируемым в  $M2$  и обращенным относительно зарегистрированного в  $M2$  фазовым профилем к плоскости  $M1$ . Если расстояние  $Z_2$  точно равно расстоянию  $Z_1$ , то в  $M1$  распределение амплитуды излучения будет точно таким же, как у опорного пучка, падающего на искажающий экран, т.е. гауссовским. Присвоив гауссовскому пучку в плоскости  $M1$  фазовый профиль, обратный вычисленному в компьютерной программе, на входе в искажающую среду (после прохода пучком расстояния  $Z_1$ ) мы получаем распределение амплитуды, точно совпадающее с распределением опорного излучения.

На рис. 1 показано изменение амплитуды опорного (верхний ряд) и корректируемого (нижний ряд) излучения в процессе распространения. Каждое изображение расположено под той плоскостью трассы, которой оно соответствует. Здесь видно, что в плоскости  $M1$  амплитуда опорного излучения точно совпадает с амплитудой пучка, падающего на искажающий экран, а при распространении корректируемого пучка в  $M2$  действительно получается требуемое распределение интенсивности. Отметим, что при отсутствии ограничений на характеристики адаптивной системы, а именно: при бесконечно высоком быстродействии, абсолютно точном определении и задании фазы, бесконечном радиусе апертуры полная компенсация достигается при любых параметрах экрана, т.е. качество работы системы не зависит от интенсивности турбулентности.

Все приведенные выше аргументы справедливы только для случая, когда искажения задаются одним фазовым экраном, поэтому механический перенос построенного алгоритма в систему компенсации рас-

пределенного искажающего слоя приводит к потере эффективности управления [10]. В этом случае опорный пучок в плоскости  $M1$  отличается от гауссовского, а в плоскости  $M2$  распределение амплитуды корректируемого пучка не совпадает с требуемым.

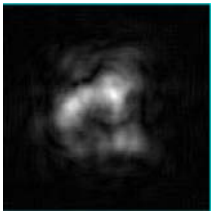
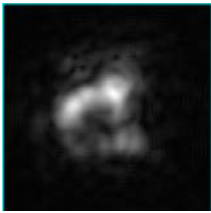
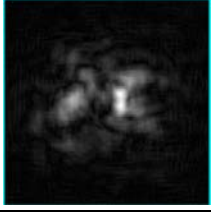
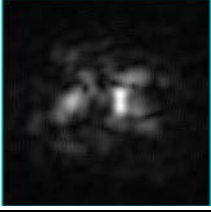
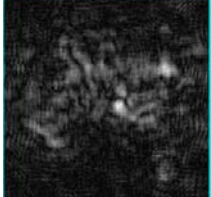
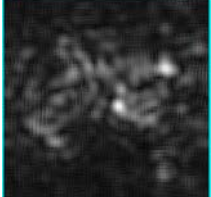
Для решения проблемы на основе рассмотренного выше метода мы предлагаем использовать следующий итерационный алгоритм. Как и в предыдущем случае, регистрация параметров выполняется в  $M2$ , затем данные поступают в программу. В модели фаза сопрягается, пучок проходит к  $M1$ , в плоскости  $M1$  амплитуда опорного пучка заменяется на гауссовскую амплитуду «прямого» пучка, выполняется сопряжение фазы, затем моделируется распространение к  $M2$ . В  $M2$  мы задаем распределение, совпадающее с требуемой амплитудой, выполняем сопряжение фазы и вновь моделируем проход пучка к плоскости  $M1$ . Процедура повторяется несколько раз, в результате на входе в искажающую среду получается пучок с профилем, близким к заданному.

До настоящего времени не удалось математически строго доказать сходимость алгоритма. Тем не менее можно с уверенностью утверждать, что он обеспечивает высокую точность задания требуемой амплитуды во всех ситуациях, характерных для атмосферной оптики. Этот тезис иллюстрируется данными табл. 1, в которой помещены распределения светового поля опорного пучка, полученные при распространении в условиях самовоздействия и при наличии турбулентных искажений.

В крайнем левом столбце таблицы содержатся параметры, характеризующие искажающее воздействие среды, в следующем столбце – распределение

Таблица 1

Точность задания требуемого распределения амплитуды на входе в искажающую среду в различных условиях

Параметр	Амплитудное распределение		Квадратичное отклонение
	опорного излучения	корректируемого пучка	
$R_v = -20,$ $r_0 = 0,001$			$\varepsilon = 0,112$
$R_v = 0,$ $r_0 = 0,004$			$\varepsilon = 0,189$
$R_v = 0,$ $r_0 = 0,002$			$\varepsilon = 0,279$

амплитуды опорного излучения в плоскости  $M2$ , т.е. то распределение, которое необходимо получить, и амплитуда, формируемая в адаптивной системе. Последний столбец содержит значения квадратичной ошибки

$$\varepsilon = \frac{\iint \sqrt{[A(x,y) - A_{ref}(x,y)]^2} dx dy}{\iint A(x,y) dx dy},$$

характеризующей отклонение полученного пучка от заданного. Здесь  $A_{ref}(x,y)$  и  $A(x,y)$  – распределения амплитуды опорного и корректируемого излучений.

Видно, что в условиях, когда требуемое распределение имеет достаточно простую форму, квадратичная ошибка невелика (11% для  $R_0 = -20$  и  $r_0 = 0,001$ , первая строка табл. 1). Точность задания уменьшается с увеличением сложности рельефа амплитудного распределения опорного пучка. Так при высокой интенсивности турбулентности ( $r_0 = 0,002$ )  $\varepsilon$  увеличивается до 28% (нижняя строка табл. 1).

#### 4. Компенсации самовоздействия и турбулентности с использованием алгоритма амплитудно-фазового управления

Качество адаптивной коррекции для случая, когда искажения вызваны турбулентностью высокой интенсивности, иллюстрируется на рис. 2 (здесь и далее длина трассы  $Z$  нормирована на дифракци-

онную длину). Приведены значения критерия фокусировки  $J$ , зарегистрированные в каждом из численных экспериментов.

Из рис. 2 видно, что амплитудно-фазовая коррекция позволяет получить увеличение эффективности компенсации искажений по сравнению с фазовым управлением более чем в 10 раз и сформировать в плоскости наблюдения пучок с распределением амплитуды, близким к гауссовскому.

Количественные данные, характеризующие эффективность работы системы при компенсации атмосферной турбулентности, представлены также на рис. 3 и 4.

Турбулентность моделируется 5 экранами, равномерно расположенными по трассе, длина трассы  $Z = 0,5$ . Можем видеть, что использование амплитудно-фазовой коррекции позволяет получить во всей области изменения  $r_0$  практически постоянные значения критерия фокусировки. Фактически мы получаем значения  $J$ , соответствующие коллимированному пучку, распространяющемуся в среде без искажений.

Отметим отличие от этих данных результатов фазового сопряжения, при использовании которого значения критерия уменьшаются с ростом интенсивности искажений. Для минимального в используемой расчетной сетке значения  $r_0$  двухзеркальная система обеспечивает увеличение эффективности в 1,8 по сравнению с фазовым сопряжением (рис. 4, усредненные результаты), для отдельных реализаций турбулентности это отличие может достигать 5–6 раз (рис. 3, кривые 2 и 3).

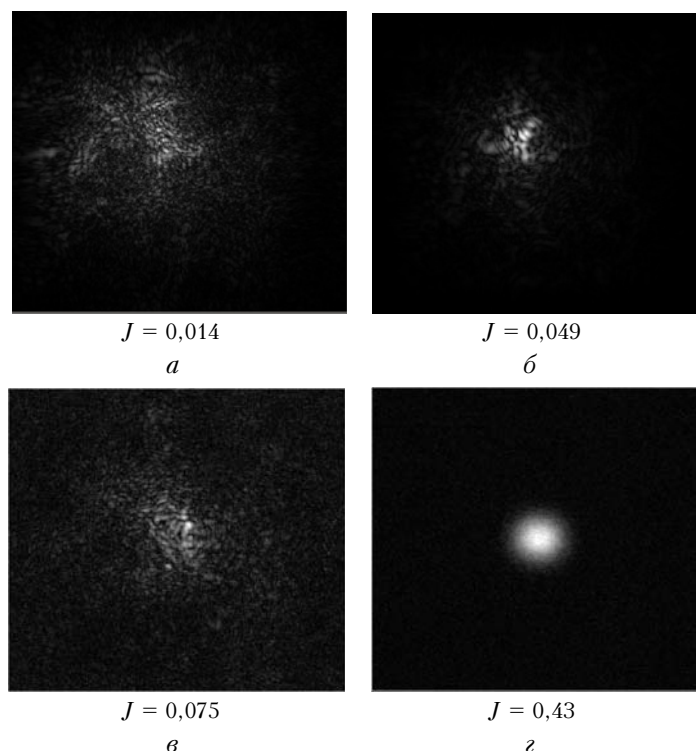


Рис. 2. Результаты амплитудного распределения пучка, прошедшего слой искажающей среды длиной  $Z = 0,5$  при  $r_0 = 0,001$ : без коррекции для коллимированного (*a*) и оптимально сфокусированного пучков (*б*), при использовании фазового сопряжения (*в*) и амплитудно-фазового управления (*г*)

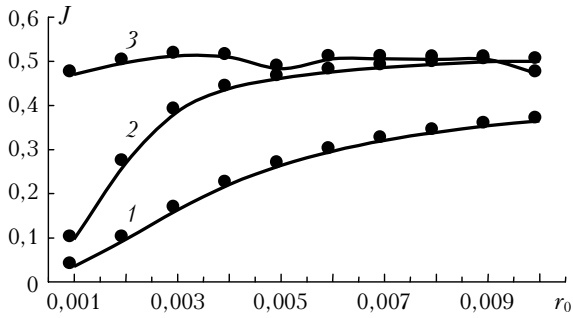


Рис. 3. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности от интенсивности искажений для одной из реализаций. Результат работы системы: без управления (1); системы фазового сопряжения (2); идеальной системы (3)

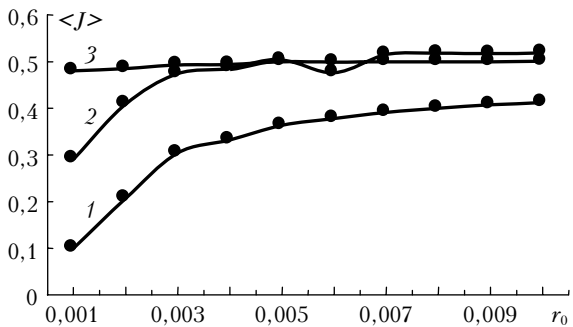


Рис. 4. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности от интенсивности искажений при усреднении по 50 реализациям. Номера кривых и параметры задачи соответствуют предыдущему графику

Устойчиво работает система амплитудно-фазового управления и в условиях теплового самовоздействия. Качественно процесс коррекции иллюстрируется данными табл. 2, 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.

Таблица 2

**Иллюстрация использования алгоритма амплитудно-фазового управления для коррекции теплового самовоздействия**

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

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 на оси распространения излучения.

Данные, количественно характеризующие компенсацию самовоздействия, приведены на рис. 5, 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 (от  $|R_v| = 10$  до  $|R_v| = 50$ ) критерий фокусировки остается равным 0,5, т.е. 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 ( $|R_v| = 10$ ) до 0,1 ( $|R_v| = 50$ ). Можно заключить, что для выбранных параметров задачи амплитудно-фазовое управление позволяет получить увеличение эффективности коррекции в 5 раз по сравнению с фазовым сопряжением.

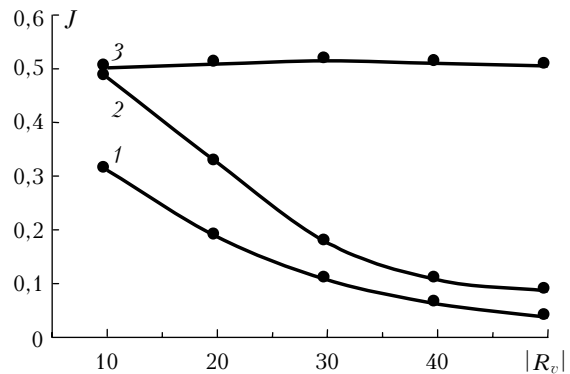


Рис. 5. Компенсация теплового самовоздействия с использованием двухзеркальной системы.  $Z = 0,5$ . Кривая 1 – результат работы системы без управления; 2 – системы фазового сопряжения; 3 – идеальной системы

Преимущества двухзеркальной системы очевидны и в ситуациях, когда искажения обусловлены совместным влиянием турбулентности и самовоздействия. Соответствующие данные помещены на рис. 6–9.

Варьируемым параметром численных экспериментов здесь являлся радиус Фрида. Для первых двух графиков параметр нелинейности был задан равным  $-20$  ( $|R_v| = 20$ , умеренная мощность излучения), для второй пары графиков значение модуля параметра нелинейности было увеличено до 40. В обоих случаях результирующие значения критерия фокусировки при амплитудно-фазовом управлении были близки к 0,5.

Нужно также отметить, что зарегистрированное качество коррекции очень незначительно зависело от параметров среды и пучка. Это означает, что

в плоскости наблюдения мы получали пучок с распределением интенсивности, близким к гауссовскому профилю, или, другими словами, почти полную коррекцию искажений во всем диапазоне изменения параметров задачи.

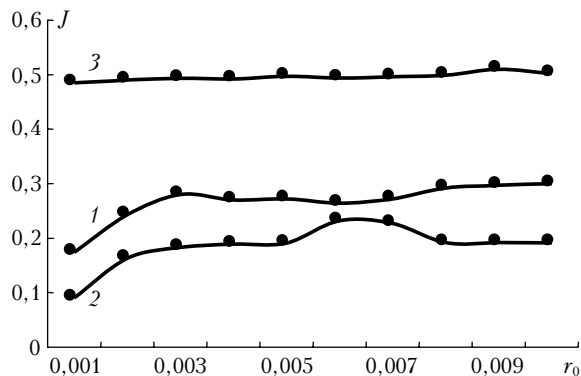


Рис. 6. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности и теплового самовоздействия от интенсивности искажений среды для одной из реализаций. Параметр нелинейности  $R_v = -20$ . Результат работы системы без управления (кривая 1); системы фазового сопряжения (2); идеальной системы (3)

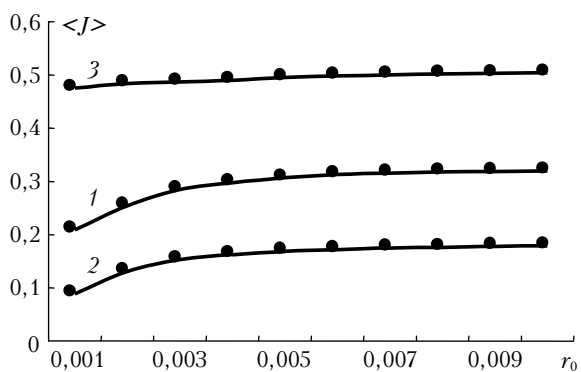


Рис. 7. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности и теплового самовоздействия от интенсивности искажений среды при усреднении по 50 реализациям. Номера кривых и параметры задачи см. в подписи к рис. 6

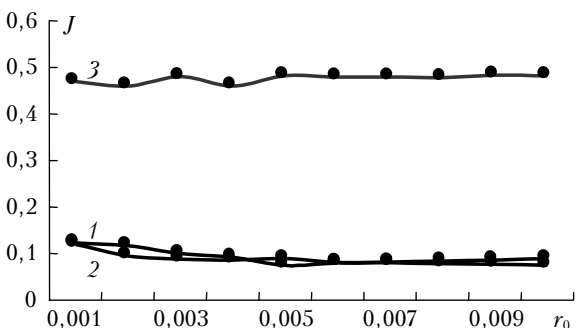


Рис. 8. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности и теплового самовоздействия от интенсивности искажений среды для одной из реализаций. Параметр нелинейности  $R_v = -40$ . Результат работы системы без управления (кривая 1); системы фазового сопряжения (2); идеальной системы (3)

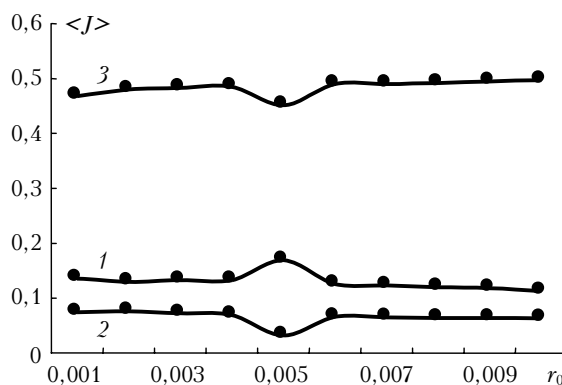


Рис. 9. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности и теплового самовоздействия от интенсивности искажений среды при усреднении по 50 реализациям. Номера кривых и параметры задачи см. в подписи к рис. 8

Значительно более низкая эффективность коррекции наблюдалась при использовании фазового сопряжения. Полученные здесь результирующие значения критерия слабо зависели от радиуса Фрида, т.е. в обоих случаях (при  $|R_v| = 20$  и  $40$ ) основной вклад в суммарные искажения вносило тепловое самовоздействие. Но при этом несущественным было и отличие значений критерия от данных, полученных без коррекции. Особенно это проявилось при  $|R_v| = 40$ , когда значения критерия при управлении (рис. 9, кривая 2) превышают значения без управления (рис. 9, кривая 1) не более чем на 0,05, а для отдельных реализаций эти данные почти точно совпадают (соответствующие кривые на рис. 8).

1. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы 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 атмосф. 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 // Изв. вузов. Физ. 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 // Appl. Opt. 2006. V. 45. N 12/20. P. 189–196.
6. Barchers J.D. Evaluation of the impact of finite-resolution effects on scintillation compensation using two deformable mirrors // J. Opt. Soc. Amer. A. 2001. V. 18. N 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 // Appl. Opt. 1998. V. 37. N 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 // Изв. вузов. Физ. 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 двух-зеркальной адаптивной системе // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 12. С. 1073–1077.
11. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Сенников В.А., Макенова Н.А., Тартаковский В.А., Коняев П.А. Фазовое и амплитудно-фазовое управление лазерным пучком при распространении его в атмосфере // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 9. С. 825–832.

***F.Yu. Kanev, V.P. Lukin, N.A. Makenova, E.I. Moisey. A new algorithm of formation of required amplitude distribution under the phase control of radiation. Increase of a two-mirror adaptive system efficiency.***

Possibility is considered in the paper to correct the thermal and turbulent distortions of laser radiation by amplitude-phase control, realized in a two-mirror adaptive system. An iteration algorithm is proposed to form the required amplitude distribution of a corrected beam with control over the beam phase in the plane positioned at some distance from the emitting aperture of the system; characteristics of its precision are presented. Advantages of the method are demonstrated in numerical experiments in comparison with phase-conjugation algorithm.