

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ.

Ч. 1. ФОРМИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Ф.Ю. Канев, Н.А. Макенова*, С.В. Пустынников*, 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

Представлен алгоритм формирования требуемого распределения амплитуды лазерного излучения при управлении его фазой, выполнены оценки точности алгоритма в задаче формирования амплитуды, прошедшего протяженный слой искажающей среды. Рассмотрена возможность реализации амплитудно-фазовой коррекции атмосферных искажений в адаптивной системе, включающей два деформируемых зеркала.

Ключевые слова:

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

1. Системы амплитудно-фазового управления излучением

В опубликованных ранее работах нами было показано, что в адаптивных системах, построенных на основе алгоритма фазового сопряжения, нарушается принцип оптической обратимости, поэтому с их использованием достигается лишь частичная компенсация искажений излучения, проходящего протяженный участок атмосферной трассы [1]. Для полной коррекции на входе в среду необходимо задать распределение амплитуды корректируемого пучка, совпадающее по форме с распределением опорного излучения, при задании сопряженной фазы [2].

Выполнить указанную операцию возможно различным образом. Например, для этого используется обращение волнового фронта опорного излучения в нелинейном кристалле, реализуемое на основе явления вынужденного рассеяния Мандельштама–Брюллиена (кристалл обычно называется ВРМБ-зеркалом) [3]. Известные недостатки данного метода – это наличие порогового значения мощности, характерного для эффекта вынужденного рассеяния, искажений, возникающих в нелинейном кристалле, и потери, которые составляют 20...40 % от полной мощности излучения.

Свободными от таких недостатков, как порог и потери, являются системы амплитудно-фазового управления, в которых обращение волнового фронта осуществляется с использованием двух адаптивных зеркал, разделенных промежутком неискажающей среды [4]. Первое зеркало задает требуемое распределение амплитуды на выходе из системы, а второе формирует фазовый профиль, обратный относительно фазы опорного сигнала.

Построению двухзеркальных адаптивных систем уделяется большое внимание исследователей как в России, так и за рубежом [5–7], но, несмотря

на обширную библиографию по данному вопросу, до настоящего времени не решена основная проблема, свойственная амплитудно-фазовому управлению 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] и [7] сообщают лишь о частичной коррекции искажающего воздействия атмосферы, а в [8] получена полная компенсация только для тонкого слоя турбулентной среды.

В настоящей статье приведено описание итерационного алгоритма формирования заданного распределения амплитуды, выполнены оценки его точности в условиях, когда требуется получить распределение амплитуды пучка, прошедшего протяженный слой искажающей среды.

2. Характеристики пучка и среды

Исследование адаптивной коррекции было выполнено на основе методов математического моделирования. 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]:

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

где k – волновое число; I_0 – плотность мощности на оси пучка в плоскости апертуры источника; a_0 – начальный радиус пучка; V – скорость потока; ρ – плотность среды; T – температура; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; α – показатель поглощения; n_0 – невозмущенное значение показателя преломления n .

Интенсивность турбулентных искажений на трассе длиной L определялась радиусом Фрида r_0 , связанным со структурной постоянной C_n и радиусом когерентности пучка r_k формулами [2]:

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

$$r_0 = 3,18 r_k.$$

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

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

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

Во всех численных экспериментах длина трассы Z была нормирована на дифракционную длину излучения $Z_d = ka_0^2$, радиус Фрида r_0 – 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 наших предыдущих публикациях [10, 11], где были помещены 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 излучения («прямой пучок») в системе схематически показано на рис. 1. Управление фазой осуществляется в плоскостях М1 и М2, разделенных участком свободной дифракции Z_1 (фактически, плоскость М2 является плоскостью выходной апертуры), на расстоянии Z_2 от М2 помещен искажающий экран.

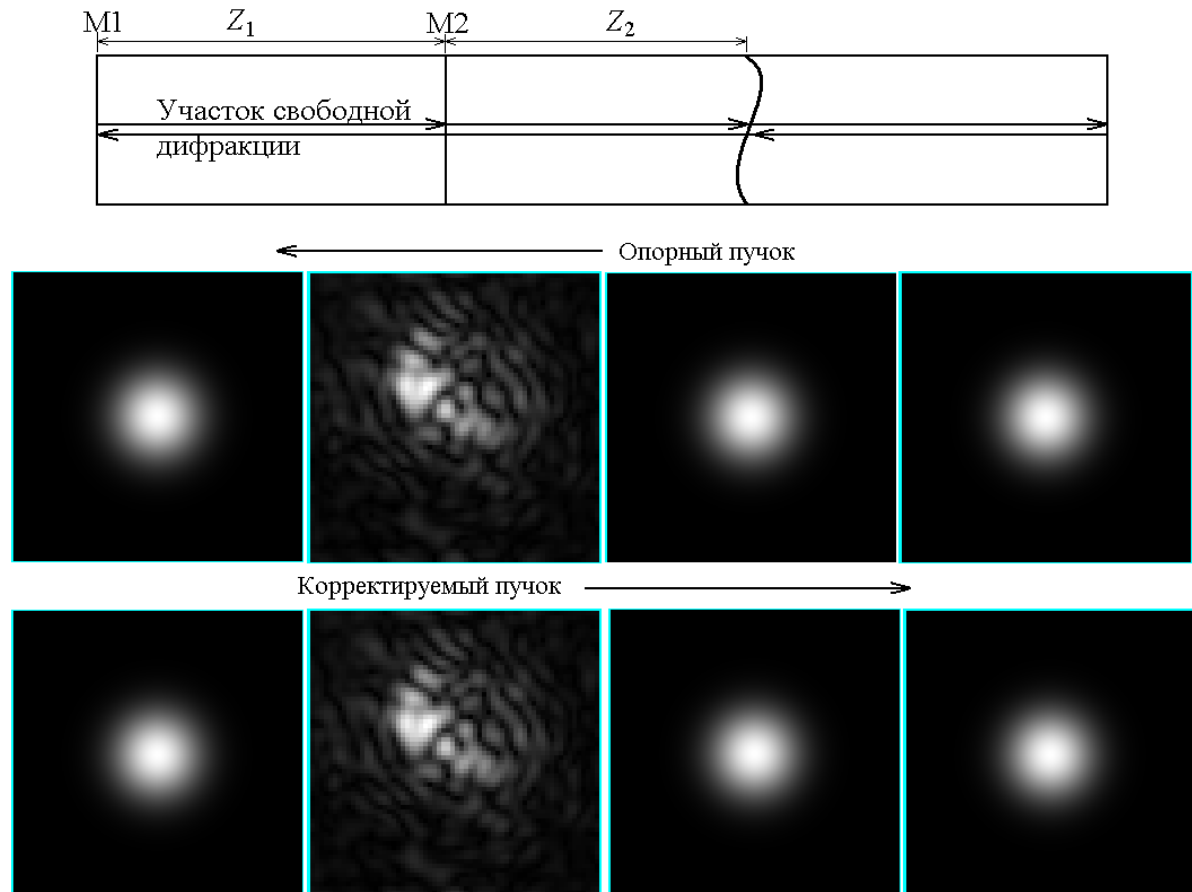


Рис. 1. Формирование амплитудного распределения опорного излучения при компенсации тонкого по сравнению с длиной трассы слоя искажающей среды

Опорное излучение, в качестве которого использовался гауссовский пучок, распространяется в данной схеме от крайней правой плоскости в направлении адаптивной системы, проходит через экран, искажается и падает на датчики, помещенные в плоскость M2, которые регистрируют его амплитудное и фазовое распределения. В результате компьютерной обработки этих 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, регистрируемым в M2 и обращенным относительно зарегистрированного в M2 фазовым профилем к плоскости M1. Если расстояние Z_2 равно расстоянию Z_1 , 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), мы получаем распределение амплитуды, точно совпадающее с распределением опорного излучения.

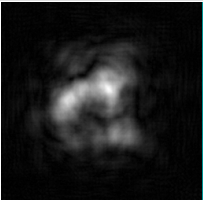
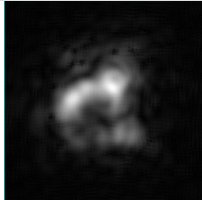
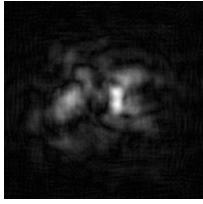
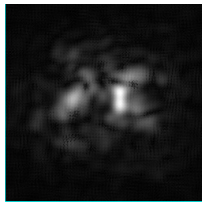
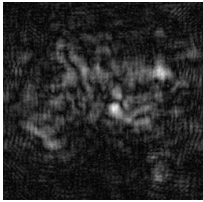
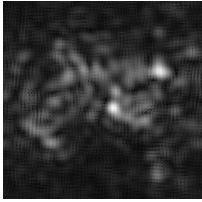
В нижней части рис. 1 полутоновыми изображениями иллюстрируется изменение амплитуды опорного (верхний ряд) и корректируемого излучения в процессе распространения. Каждое изображение расположено под той плоскостью трассы, которой оно соответствует. Видно, что в плоскости M1 амплитуда опорного излучения 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, т. е. 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 распределенного 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 мы предлагаем использовать следующий итерационный алгоритм, построенный на основе рассмотренного выше метода. Как и в предыдущем случае, регистрация пара-

метров выполняется в M2, затем данные поступают в компьютер, содержащий модель распространения излучения в вакууме. 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.

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

Параметры искажающей среды	Амплитудное распределение		ϵ
	Опорного излучения	Корректируемого пучка	
$R_v = -20$, $r_0 = 0,10$			0,112
$R_v = 0$, $r_0 = 0,04$			0,189
$R_v = 0$, $r_0 = 0,02$			0,279

До настоящего времени не удалось математически строго доказать сходимость алгоритма. В то же время можно с уверенностью утверждать, что он обеспечивает высокую точность задания требуемой амплитуды во всех ситуациях, характерных для атмосферной оптики. Данный тезис иллюстрируется данными таблицы, 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 амплитуды опорного излучения в плоскости M2, т. е. то распределение, которое необходимо получить, затем — амплитуда, формируемая в адаптивной системе. Последний столбец содержит значения квадратичной ошибки

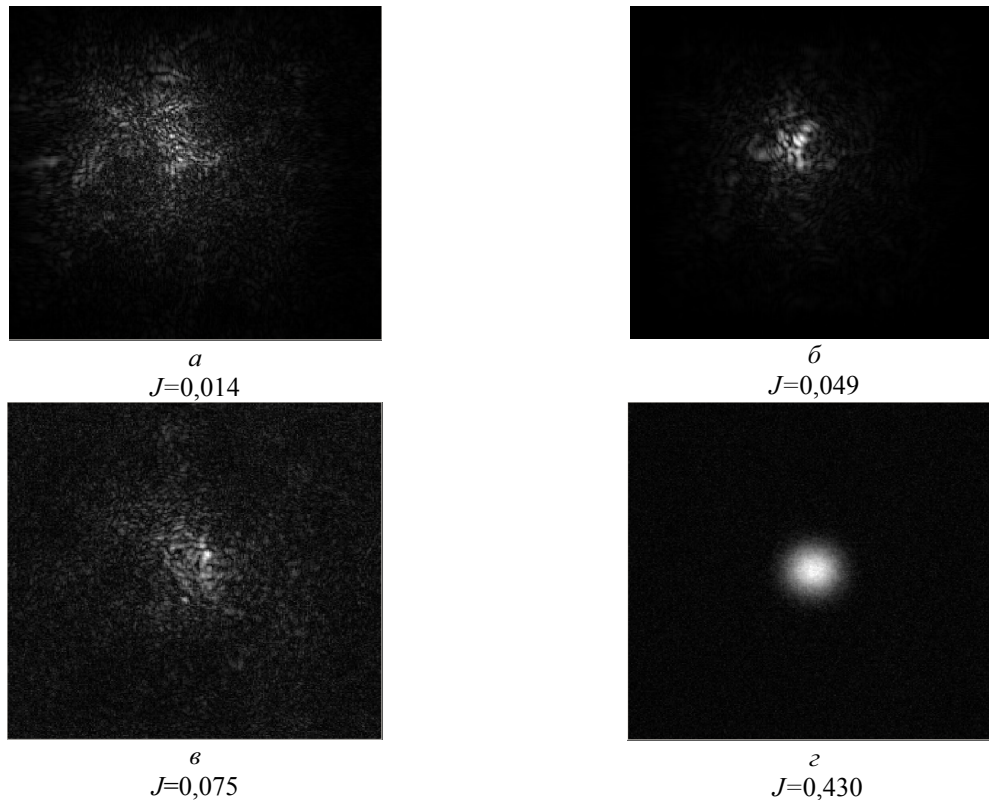


Рис. 2. Амплитудное распределение лазерного пучка, прошедшего слой искажающей среды длиной $Z=0,5$ при $r_0=0,01$

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

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

По данным таблицы видно, что в условиях, когда требуемое распределение имеет достаточно простую форму, квадратичная ошибка невелика (0,112 для $R_v=-20$ и $r_0=0,1$, первая строка таблицы). Точность задания уменьшается с увеличением сложности рельефа амплитудного распределения опорного пучка, например, при высокой интенсивности турбулентности ($r_0=0,02$) ε составляет 0,279 (нижняя строка таблицы).

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

Результаты адаптивной коррекции искажений пучков для случая, когда абберации вызваны турбулентностью высокой интенсивности, качественно иллюстрируется на рис. 2. Здесь приведено ампли-

тудное распределение коллимированного (а) и оптимально сфокусированного пучков (б), прошедших слой искажающей среды при разомкнутом контуре адаптивной коррекции, а также распределения, полученные в результате фазового сопряжения (в) и амплитудно-фазового управления (г). Под иллюстрациями помещены значения $J(t)$, зарегистрированные в каждом из численных экспериментов. В результате амплитудно-фазового управления в плоскости наблюдения формируется пучок с распределением амплитуды, близким к гауссовскому, при этом регистрируются значения критерия фокусировки, более чем в 10 раз превышающие результаты, полученные при фазовым сопряжении.

Заключение

Приведено описание итерационного алгоритма формирования заданного амплитудного распределения когерентного излучения. Показано, что квадратичное отклонение при задании амплитуды пучка, прошедшего протяженный слой атмосферы, не превышает 30 % даже при высокой интенсивности турбулентности. Рассмотрена возможность использования алгоритма в двухзеркальной адаптивной системе амплитудно-фазового управления.

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.