

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Н.А. Макенова

Принципиальные ограничения алгоритма фазового сопряжения и реализация амплитудно-фазового управления в двухзеркальной адаптивной системе

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

На основе методов численного эксперимента выполнен анализ распространения лазерного излучения в турбулентной атмосфере и проведено сравнение эффективности методов фазового и амплитудно-фазового управления пучком. Так как только при обращении волнового фронта возможна полная коррекция турбулентных искажений, рассмотрена возможность реализации этого алгоритма в адаптивной системе, включающей два зеркала, разделенных промежутком, в котором пучок распространяется в условиях свободной дифракции. Показано, что данная система обладает более высокой эффективностью по сравнению с системой фазового сопряжения.

1. Схема численного эксперимента

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, были выполнены на основе методов численного эксперимента. Схематическое изображение моделируемой оптической системы представлено на рис. 1. Лазерное излучение распространяется от апертуры источника 1 до плоскости наблюдения 3.

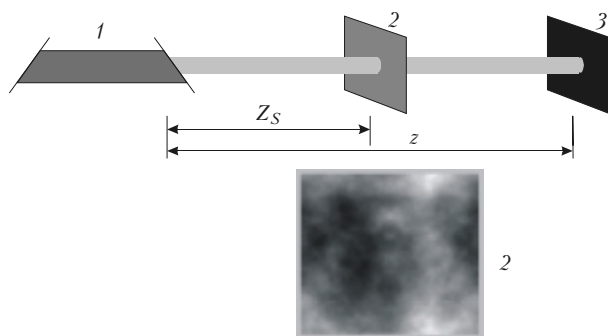


Рис. 1. Сценарий численного эксперимента по регистрации искажений пучков, обусловленных тонким турбулентным слоем

Пучок проходит через тонкий слой турбулентной среды 2, моделируемый одним фазовым экраном, как это показано на рисунке, или через распределенную турбулентную линзу, заполняющую всю трассу от апертуры до плоскости наблюдения. В случае одного экрана его положение на трассе варьируется, т.е. изменяется расстояние Z_S от экрана до лазера. Интенсивность атмосферной турбулентности характеризуется радиусом Фрида [1] r_0 :

$$r_0 = \left(0,423k^2 \int_0^L C_n^2(l) dl \right)^{-3/5}, \quad (1)$$

где L – толщина турбулентного слоя; C_n^2 – структурная постоянная атмосферы; k – константа. Для характеристики остаточных искажений и эффективности компенсации в работе использовался критерий фокусировки [2]:

$$J(t) = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x,y) I(x,y,z_0,t) dx dy, \quad (2)$$

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиуса a_0 . Здесь P_0 – полная мощность пучка; $\rho(x,y) = \exp[-(x^2 + y^2)/a_0^2]$ – апертурная функция.

Известно, что при распространении в случайной неоднородной среде лазерный пучок искажается, увеличивается его энергетический радиус, центр тяжести смещается случайным образом [3]. Это приводит к уменьшению концентрации поля в плоскости наблюдения, т.е. к уменьшению критерия J . При этом чем меньше радиус Фрида, тем большие искажения испытывает пучок. Иллюстрация данной зависимости приведена на рис. 2.

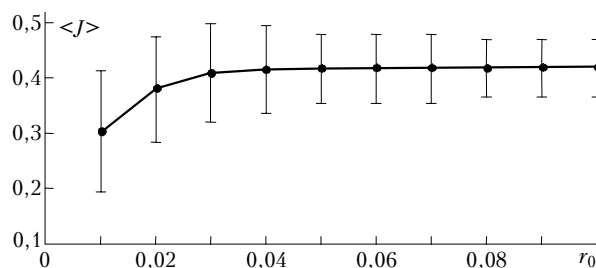


Рис. 2. Зависимость концентрации поля в плоскости наблюдения от r_0 , полученная при усреднении по 50 реализациям. Длина трассы $z = 0,5$, протяженность распределенной турбулентной линзы равна длине трассы

Для определения влияния отдельных атмосферных слоев (точнее, их положения) на интенсивность

искажений, на трассе распространения был помещен только один фазовый экран. Значения критерия, полученные при этом для различных r_0 и на различных расстояниях от экрана до апертуры источника Z_S , представлены на рис. 3.

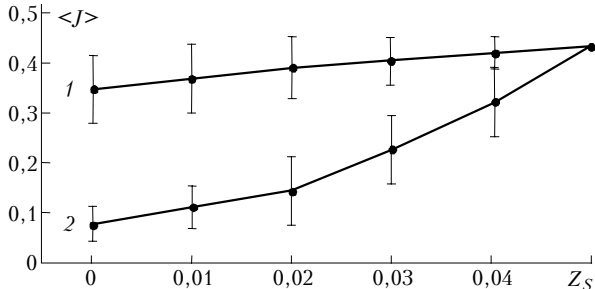


Рис. 3. Зависимость интенсивности искажений от положения турбулентного слоя (турбулентного экрана) на трассе распространения. Усреднение выполнено по 50 реализациям. Параметры: $r_0 = 0,1$ (кривая 1), $r_0 = 0,01$ (кривая 2). Длина трассы $z = 0,5$

Можем видеть, что наибольшие искажения обусловлены турбулентными слоями, расположенными вблизи апертуры источника. С увеличением Z_S искажения уменьшаются. Естественно, что экран, расположенный в плоскости регистрации, не влияет на изменения амплитуды и на значения критерия J .

2. Фазовое и амплитудно-фазовое управление пучком

Для компенсации искажений, обусловленных отдельными фазовыми экранами, в работе был использован алгоритм фазового сопряжения (ФС). Алгоритм работает по следующей схеме. Лазерный пучок

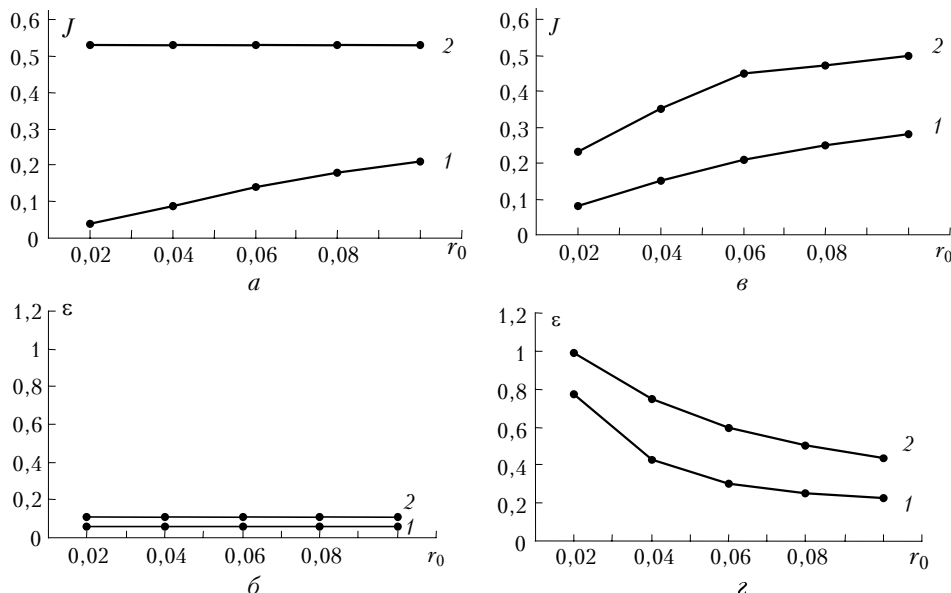


Рис. 4. Зависимость критерия фокусировки J (а и в; кривая 2 – результат управления, 1 – без управления) и квадратичной ошибки ϵ (б и г; кривая 2 – плоскость апертуры источника, 1 – плоскость регистрации) от интенсивности турбулентных искажений. Турбулентность моделируется одним экраном, расположенным на различных расстояниях от апертуры лазера. Первый столбец рисунков – расстояние от апертуры до искажающего экрана $Z_S = 0$, второй столбец – $Z_S = 0,25$. Полная длина трассы $z = 0,5$

распространяется от плоскости апертуры источника к плоскости регистрации, навстречу ему направлен опорный пучок. В плоскости апертуры источника фаза «прямого» пучка $\varphi(x, y)$ задается равной с обратным знаком фазе $\psi(x, y)$ опорного излучения

$$\varphi(x, y) = -\psi(x, y), \quad (3)$$

амплитуда прямого пучка остается гауссовской.

Результаты управлений на основе ФС представлены на рис. 4 (идеальная адаптивная система, ограничения, вносимые отдельными элементами, не учитываются). Можем видеть, что при управлении достигается полная компенсация экранов, расположенных в плоскости апертуры источника при любой интенсивности искажений (рис. 4,а, кривая 2), тогда как слои, находящиеся на конечном расстоянии от лазера, невозможно компенсировать даже в идеальной системе (рис. 4,в, кривая 2). Объясняется данная особенность нарушением принципа оптической обратимости при выполнении ФС во втором случае. Отмеченное нарушение также можно проиллюстрировать с введением еще одного параметра – квадратичной ошибки ϵ , определяемой как

$$\epsilon = \frac{\iint \sqrt{(A(x, y) - A_{\text{ref}}(x, y))^2} dx dy}{\iint A(x, y) dx dy} \quad (4)$$

и характеризующей, насколько гауссовское распределение амплитуды «прямого» пучка $A(x, y)$ отличается от распределения амплитуды $A_{\text{ref}}(x, y)$ опорного сигнала (или насколько опорный пучок отличается от гауссовского). Значения ϵ , полученные при компенсации экранов, расположенных на различных расстояниях от апертуры источника, приводятся на рис. 4, б и г.

Видно, что для экрана, находящегося в плоскости апертуры источника, значения ϵ малы. Это говорит о том, что принцип оптической обратимости выполняется с высокой точностью. В этом случае достигается практически полная компенсация искажений. С увеличением расстояния от апертуры до экрана значения ϵ возрастают, так как опорный пучок уже не является гауссовским. Можно сделать вывод о том, что полная компенсация экранов (турбулентных слоев), расположенных на конечном (не равном нулю) расстоянии от апертуры источника, принципиально невозможна на основе фазового сопряжения.

Полная коррекция искажений достигается в том случае, если выполняется операция обращения волнового фронта (ОВФ) [2]:

$$\text{Im}(E) = -\text{Im}(E_{\text{ref}}), \quad (5)$$

$\text{Im}(E)$ – мнимая часть комплексной амплитуды поля «прямого» пучка, $\text{Im}(E_{\text{ref}})$ – опорного излучения. Физически данная операция означает, что фаза прямого пучка берется обратной относительно фазы опорного, а амплитуда – равной амплитуде опорного.

3. Реализация амплитудно-фазового управления в двухзеркальной адаптивной системе

Выполнение ОВФ возможно в адаптивной системе, включающей два зеркала (рис. 5), разделенных промежутком, в котором пучок распространяется без искажений [4, 5]. Первое зеркало (M1) задает фазу пучка. При распространении в свободном пространстве изменения фазы приводят к изменениям амплитуды. Таким образом, в плоскости зеркала M2 (на входе в среду)

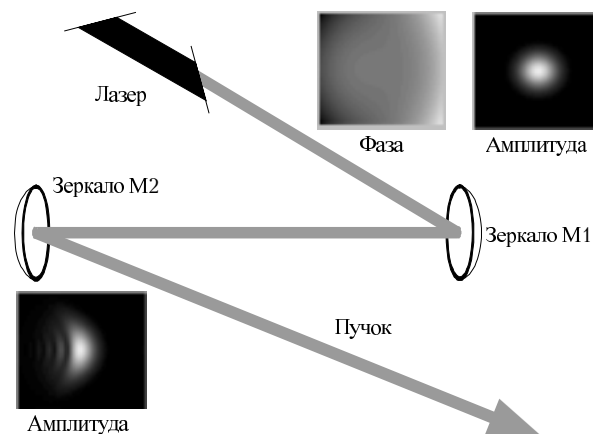


Рис. 5. Формирование заданного амплитудного распределения пучка в двухзеркальной адаптивной системе

достигается требуемое распределение интенсивности светового поля. Зеркало M2 компенсирует внесенные изменения фазы и выполняет операцию сопряжения. В результате на входе в среду формируется пучок с заданным распределением амплитудного и фазового профилей. Основная сложность в реализации данной операции – это задание фазового профиля, обеспечивающего необходимое распределение амплитуды.

Задача достаточно просто решается при наличии только одного искажающего экрана, расположенного в середине трассы. Для решения необходимо использовать следующее свойство оптического излучения: пучки, имеющие одинаковые начальные амплитудные и фазовые профили, распространяющиеся на одинаковых трассах, приобретают одинаковые распределения амплитуды и фазы. Возможность реализации амплитудно-фазового управления с использованием этого свойства показана на рис. 6 и 7.

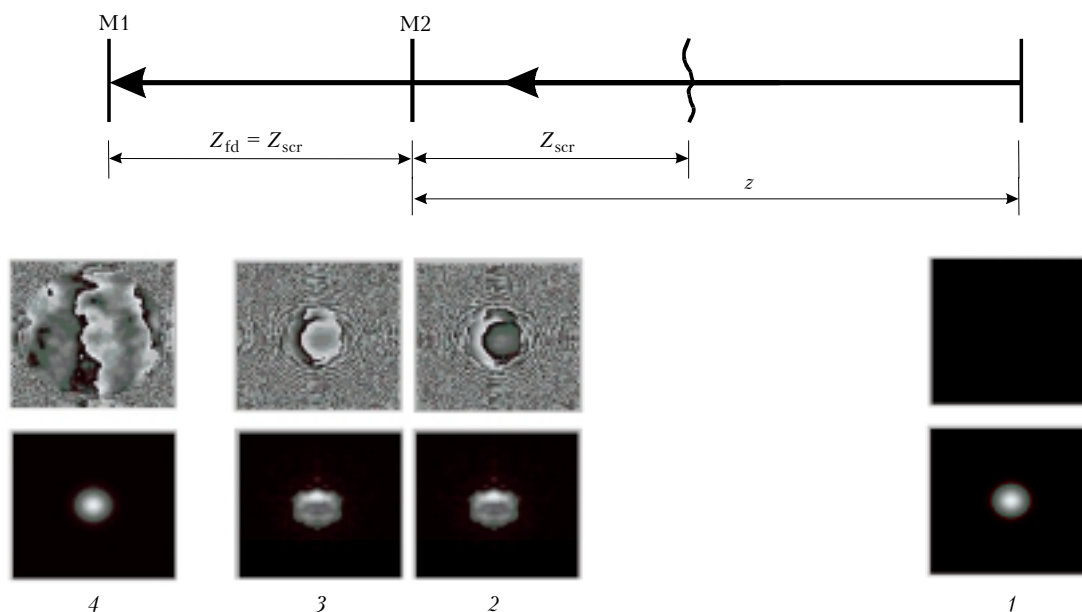


Рис. 6. Распространение опорного пучка в двухзеркальной адаптивной системе. Искажения моделируются одним экраном: 1 – фаза и амплитуда опорного пучка в плоскости регистрации; 2 – фаза и амплитуда пучка в плоскости зеркала M2 до выполнения сопряжения; 3 – фаза и амплитуда пучка в плоскости зеркала M2 после выполнения сопряжения; 4 – фаза и амплитуда пучка в плоскости зеркала M1

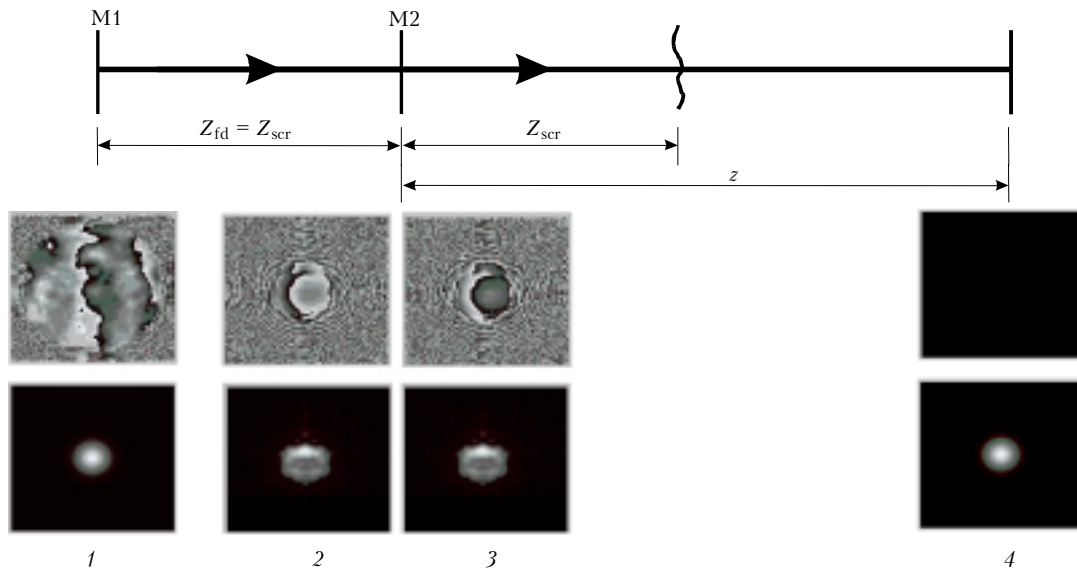


Рис. 7. Распространение «прямого» пучка в двухзеркальной адаптивной системе. Искажения моделируются одним экраном: 1 – фаза и амплитуда пучка в плоскости зеркала M1 после выполнения коррекции; 2 – фаза и амплитуда пучка в плоскости зеркала M2 до выполнения сопряжения; 3 – фаза и амплитуда пучка в плоскости зеркала M2 после выполнения сопряжения; 4 – фаза и амплитуда опорного пучка в плоскости регистрации

Опорный пучок распространяется от плоскости регистрации. При падении на экран отличие его амплитуды от начальной гауссовской и фазы от плоской обусловлено только дифракцией. Непосредственно за экраном амплитуда остается гауссовской, проход через экран привел только к изменениям фазы. При падении опорного пучка на зеркало M2 уже проявляются амплитудные искажения. Если при этом зеркалом M2 выполнить сопряжение фазы опорного пучка, оставив амплитуду без изменений, то в плоскости M1 получается точно такой же пучок, какой был непосредственно за искажающим экраном, т.е. имеющий гауссовскую амплитуду и некоторую фазу, отличающуюся от плоской. В плоскости M1 опорный пучок заменяется «прямым», фаза которого сопряжена относительно опорного, амплитуда гауссовская. Теперь выполняются все требования принципа оптической обратимости. В плоскости M2 амплитудное распределение получается одинаковым с опорным пучком, фаза задается сопряженной относительно опорного. Распространение «прямого» пучка показано на рис. 7. В результате управления достигается абсолютная компенсация искажений. Подчеркнем, что подобный результат невозможно получить с использованием алгоритма ФС.

Следующая задача, рассматриваемая в настоящей статье, – это реализация коррекции распределенной турбулентной линзы. Решение проводится на основе предположения о том, что искажения пучков, проходящих через один фазовый экран, расположенный в середине трассы, являются приблизительно равными искажениям пучков, проходящих через набор одинаковых фазовых экранов. Этот тезис подтверждается данными, представленными для этих двух случаев (табл. 1 и 2). В таблицах приводятся значения критерия J , энергетического радиуса пучка σ и смещения энергетического центра X_c и Y_c по осям, перпендикулярным направлению распространения:

Таблица 1

Параметры пучка, полученные при моделировании турбулентности одним экраном, расположенным в середине трассы ($z = 0,5$)

r_0	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02
J	0,28	0,25	0,21	0,15	0,08
σ	1,40	1,48	1,60	1,80	2,59
X_c	-0,22	-0,27	-0,34	-0,47	-0,83
Y_c	0,10	0,12	0,16	0,22	0,38

Таблица 2

Параметры пучка, полученные при моделировании турбулентности распределенной линзой, состоящей из одинаковых экранов, равномерно заполняющих трассу ($z = 0,5$)

r_0	0,1	0,08	0,06	0,04	0,02
J	0,30	0,27	0,23	0,17	0,08
σ	1,35	1,40	1,49	1,64	2,10
X_c	-0,25	-0,30	-0,37	-0,51	-0,84
Y_c	0,12	0,14	0,18	0,25	0,43

$$\sigma(t) = \left[\frac{1}{P_0 a_0^2} \iint (\mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}_c)^2 I(x, y, z, t) dx dy \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{r}_\perp = \{x, y\}$ – вектор координат точки на плоскости; \mathbf{r}_c – вектор координат энергетического центра тяжести пучка; $I(x, y, z, t)$ – интенсивность излучения;

$$X_c = \frac{1}{P_0 a_0^2} \iint x I(x, y, z, t) dx dy, \quad (7)$$

Y_c определяется аналогичной формулой. Результаты получены при различных интенсивностях турбулентных искажений. Можем видеть, что значения всех величин, введенных для характеристики излучения, действительно являются близкими.

Так как коррекция одного экрана является абсолютной, достаточно высокие результаты получаются и при компенсации распределенной линзы, моделируемой набором одинаковых случайных экранов (табл. 3).

Таблица 3

Коррекция распределенной турбулентной линзы, моделируемой набором одинаковых экранов, реализуемая в адаптивной системе, включающей два зеркала. Длина трассы $z = 0,5$; J – значения критерия, полученные без управления; $J_{\text{кор}}$ – значения, полученные в результате управления

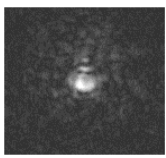
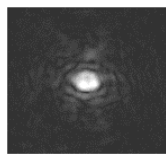
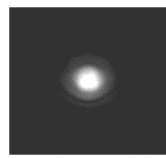
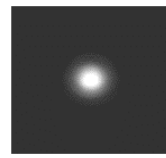
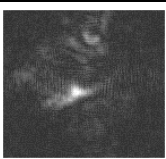
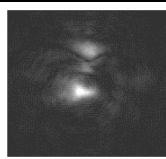
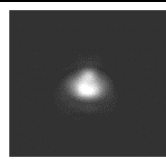
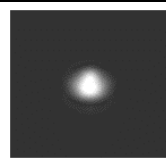
Распределение светового поля, полученное в результате коррекции				
r_0	0,005	0,01	0,05	0,1
J	0,002	0,039	0,192	0,292
$J_{\text{кор}}$	0,341	0,462	0,531	0,532
$\varepsilon (z = 0,5)$	0,66	0,46	0,13	0,07

Таблица 4

Коррекция распределенной турбулентной линзы, моделируемой набором одинаковых экранов, реализуемая на основе алгоритма фазового сопряжения

Распределение светового поля, полученное в результате коррекции				
r_0	0,005	0,01	0,05	0,1
J	0,002	0,039	0,192	0,292
$J_{\text{кор}}$	0,105	0,163	0,452	0,501
$\varepsilon (z = 0,5)$	1,06	0,92	0,32	0,21

В этом случае не достигается абсолютная компенсация, но значения критерия, полученные в результате коррекции при малых радиусах Фрида, значительно выше, чем в случае использования фазового сопряжения (сравнение табл. 3 и 4).

Дальнейшие неточности проявляются при компенсации распределенной линзы, состоящей из разных экранов, генерируемых с использованием набора случайных чисел. Но и в этом случае результаты, полученные с использованием двухзеркальной системы, получаются достаточно высокими (табл. 5).

Таблица 5

Параметры пучка, полученные при компенсации распределенной турбулентности, состоящей из разных экранов ($z = 0,5$)

R_0	0,005	0,01	0,02	0,03
J	0,049	0,143	0,262	0,310
$J_{\text{кор}}$	0,41	0,47	0,50	0,50
$\varepsilon (z = 0,5)$	0,45	0,31	0,17	0,12

По приведенным данным можно заключить, что предложенный метод амплитудно-фазового управле-

ния не обеспечивает абсолютную компенсацию распределенной турбулентной линзы, но полученные значения критерия фокусировки являются более высокими, чем при чисто фазовом управлении.

1. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
2. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
3. Выслоух В.А., Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Адаптивная фокусировка интенсивных световых пучков, распространяющихся в нерегулярных средах // Изв. вузов. Физ. 1985. № 11. С. 30–41.
4. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Алгоритмы компенсации теплового воздействия // Оптика атмосф. 1991. Т. 4. № 12. С. 1237 – 1247.
5. 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. № 11. С. 42–51.

F.Yu. Kanev, V.P. Lukin, N.A. Makenova. Principal limitations of the phase conjugation algorithm and realization of amplitude-phase control in two-mirror adaptive system.

Laser radiation propagation in the turbulent atmosphere is analyzed in numerical experiments, and the efficiencies of the phase and amplitude-phase beam control methods are compared. Since complete correction of turbulent distortions is possible only at wave front reversal, realization of this algorithm is considered in the adaptive system including two mirrors separated by a gap, in which the beam propagates under free diffraction conditions. This system is shown to be far more efficient as compared to the phase conjugation system.