

Фазовое и амплитудно-фазовое управление лазерным пучком при распространении его в атмосфере

В.П.Лукин, Ф.Ю.Канев, В.А.Сенников, Н.А.Макенова, В.А.Тартаковский, П.А.Коняев

Выполнено сравнение фазовой и амплитудно-фазовой коррекции искажений лазерных пучков излучения при распространении их в турбулентной атмосфере в условиях сильных флуктуаций интенсивности. Исследуются влияние дислокаций волнового фронта и возможности управления амплитудой и фазой оптической волны. Анализируются два подхода: фазовая коррекция с применением амплитудного управления и двухзеркальная фазовая коррекция. Показана эффективность обоих подходов.

Ключевые слова: амплитуда, фаза, турбулентность, дислокации волнового фронта, адаптивная коррекция, обращение волнового фронта, двухзеркальная коррекция.

1. Введение

Строгое выполнение принципа взаимности при формировании обратного лазерного пучка требует точного воспроизведения как фазовой, так и амплитудной компоненты волны, принимаемой от опорного источника (бакена). Однако на практике приходится ограничиваться только информацией о фазе. При этом на адаптивном зеркале формируется фазосопряженный волновой фронт (ВФ) и оно освещается гауссовым пучком.

Нами проведено численное моделирование распространения обратного лазерного пучка в условиях сильных флуктуаций интенсивностей, когда имеют место разрывы ВФ. Показано различие между полным обращением волны и фазовым сопряжением (ФС) на идеальном адаптивном зеркале, детально воспроизводящем все разрывы ВФ. Предлагается при формировании обратного пучка вырезать линии разрывов. Этого можно достичь путем вывода из канала адаптивной системы тех участков ВФ, которые соответствуют областям глубокого затухания в световой волне, принимаемой от опорного источника. Делается вывод, что устранение таких участков не ухудшает свойств пучка, получаемого при ФС, и позволяет решить проблему воспроизведения дислокаций ВФ на адаптивном зеркале.

2. Численное решение задачи

При адаптивном формировании лазерных пучков в атмосфере для применения принципа взаимности необходимо, чтобы адаптивная система воспроизводила полный амплитудно-фазовый профиль волны, принимаемой от опорного источника [1, 2]. Однако на практике ограничиваются только его фазовой составляющей, заменяя

сложный амплитудный профиль простым гауссовым. Целью данного исследования являлось изучение влияния ошибки аппроксимации амплитуды, вызванной такой заменой, на эффективность коррекции, а методом исследования – численное моделирование распространения лазерного пучка в турбулентной атмосфере [2, 3]. На рис.1 приведена схема численного эксперимента. Коллимированный гауссов пучок, служивший опорным источником, распространялся через турбулентную среду (со спектральной плотностью колмогоровского типа), в плоскости адаптивного зеркала при ФС формировался обратный пучок (путем ФС или ОВФ), который и возвращался назад. При этом пучок, проходящий в прямом направлении, был назван прямым, а пучок, прошедший через атмосферу дважды, – обратным. В плоскости источника вычислялись ошибка обращения ϵ_0 , имеющая смысл нормированного среднеквадратичного отклонения амплитуды обращенного поля \tilde{A}_0 от амплитуды опорного поля A_0 в плоскости источника, и энергия E , попадающая в пределы круга с эффективным радиусом пучка:

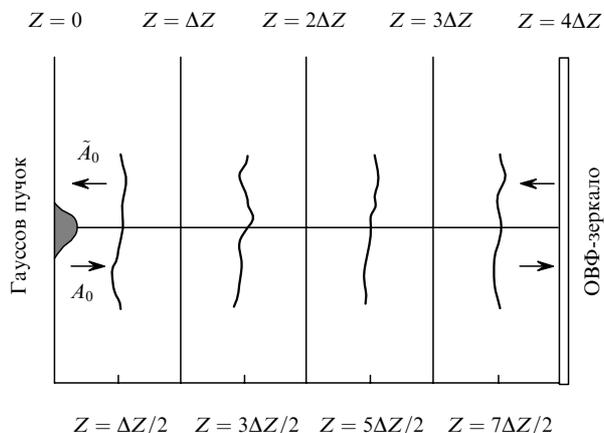


Рис.1. Схема численного эксперимента по обращению гауссова пучка, прошедшего через турбулентную среду. Число фазовых экранов $n = 4$, размер сетки 512×512 , соотношение внешнего и внутреннего масштабов турбулентности $L_0/l_0 = 10^3$.

В.П.Лукин, Ф.Ю.Канев, В.А.Сенников, Н.А.Макенова, В.А.Тартаковский, П.А.Коняев. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 1; тел.: (382)2-491-606, факс: (382)2-492-086, e-mail: lukin@iao.ru

Поступила в редакцию 25 марта 2004 г.

$$\varepsilon_0^2 = \sum_S (\tilde{A}_0 - A_0)^2 / \sum_S A_0^2, \tag{1}$$

$$E = \sum_{S_{\text{eff}}} \tilde{A}_0^2,$$

где S – площадь круга; S_{eff} – площадь круга с эффективным радиусом. Расчеты проводились с применением методов расщепления [1–3] и быстрого преобразования Фурье. В рамках паракиального приближения решалось безразмерное параболическое уравнение квазиоптики в виде

$$\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{i}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \delta n \right) W, \tag{2}$$

где $W(x, y, z)$ – комплексная амплитуда волны; δn – нормированное отклонение показателя преломления среды n . Использовалась двухциклическая схема метода расщепления, число шагов по трассе равнялось 4, порядок матрицы сетки составлял 512.

Спектральная плотность показателя преломления имела вид

$$F(\kappa_x, \kappa_y) = C_n^2 (\kappa_0^2 + \kappa_x^2 + \kappa_y^2)^{-11/6} \exp \left(-\frac{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}{\kappa_m^2} \right), \tag{3}$$

где C_n^2 – структурная постоянная показателя преломления, соответствующая колмогоровской модели турбулентности и имеющая размерность $\text{м}^{-2/3}$; $\kappa_0 = 2\pi/L_0$; $\kappa_m = 2\pi/l_0$; L_0 и l_0 – внешний и внутренний масштабы атмосферной турбулентности, нормированные на радиус пучка a_0 . Волновой параметр $Z = L\lambda/(2\pi a_0^2)$, где λ – длина волны, а L – длина трассы. Параметры численного эксперимента были таковы: $L_0 = 100$, $l_0 = 0.1$, $Z = 0.1$. Для пучка с радиусом $a_0 = 10$ см и $\lambda = 0.63$ мкм это соответствует приземному слою турбулентной атмосферы на горизонтальной трассе длиной $L = 1$ км. Влияние турбулентности на пучок характеризуется индексом мерцания в пучке β^2 , вычисляемым в плоскости обращения. Зависимость β^2 от параметра C_n^2 приведена на рис.2.

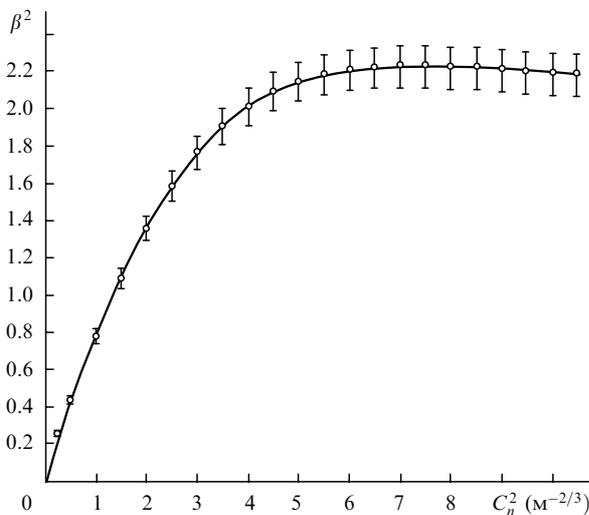


Рис.2. Зависимость индекса мерцания $\beta^2 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2$ от структурной постоянной C_n^2 , полученная в ходе численного эксперимента. Слабые флуктуации – $\beta^2 < 0.3$, сильные – $\beta^2 > 1.0$.

3. Сравнение результатов моделирования ФС и ОВФ

Нами был выполнен численный эксперимент по моделированию ФС на адаптивном зеркале и распространению обратного пучка в турбулентной атмосфере. Обратный пучок формировался из гауссова пучка на адаптивном зеркале, сопряженно воспроизводящем форму ВФ опорного гауссова пучка, прошедшего в турбулентной атмосфере.

Было проведено сравнение трех разных способов формирования обратного пучка на идеальном адаптивном зеркале: с помощью полного ОВФ, ФС с отслеживанием центра тяжести пришедшего пучка и гауссова пучка, прошедшего через слой атмосферной турбулентности без фазовой коррекции. На рис.3 для всех трех случаев приведены рассчитанные зависимости ошибки обращения ε_0 и параметра E для формируемых пучков, прошедших слой атмосферы, от структурной постоянной C_n^2 .

На рис.4 показаны картины распределения интенсивности и фазы гауссова пучка, прошедшего турбулентную среду, в плоскости адаптивного зеркала. Пучок разбивается на струи, которые разделены областями глубокого затухания, содержащими оптические вихри. На рис.5 и 6 приведены картины распределения интенсивности и фазы поля обратного пучка в плоскости источника (по сравнению с исходным гауссовым пучком с плоским ВФ). Для обратной волны, полученной путем полного ОВФ, рас-

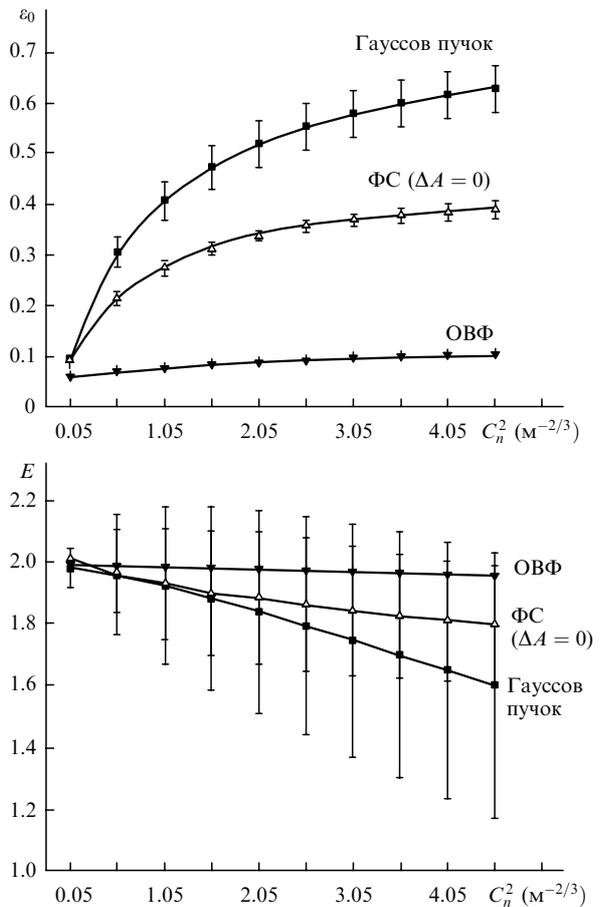


Рис.3. Зависимости ошибки обращения ε_0 и параметра E от C_n^2 для различных способов формирования обратного пучка (с помощью ОВФ, ФС и гауссова пучка без фазовой коррекции) при числе реализаций $N = 100$.

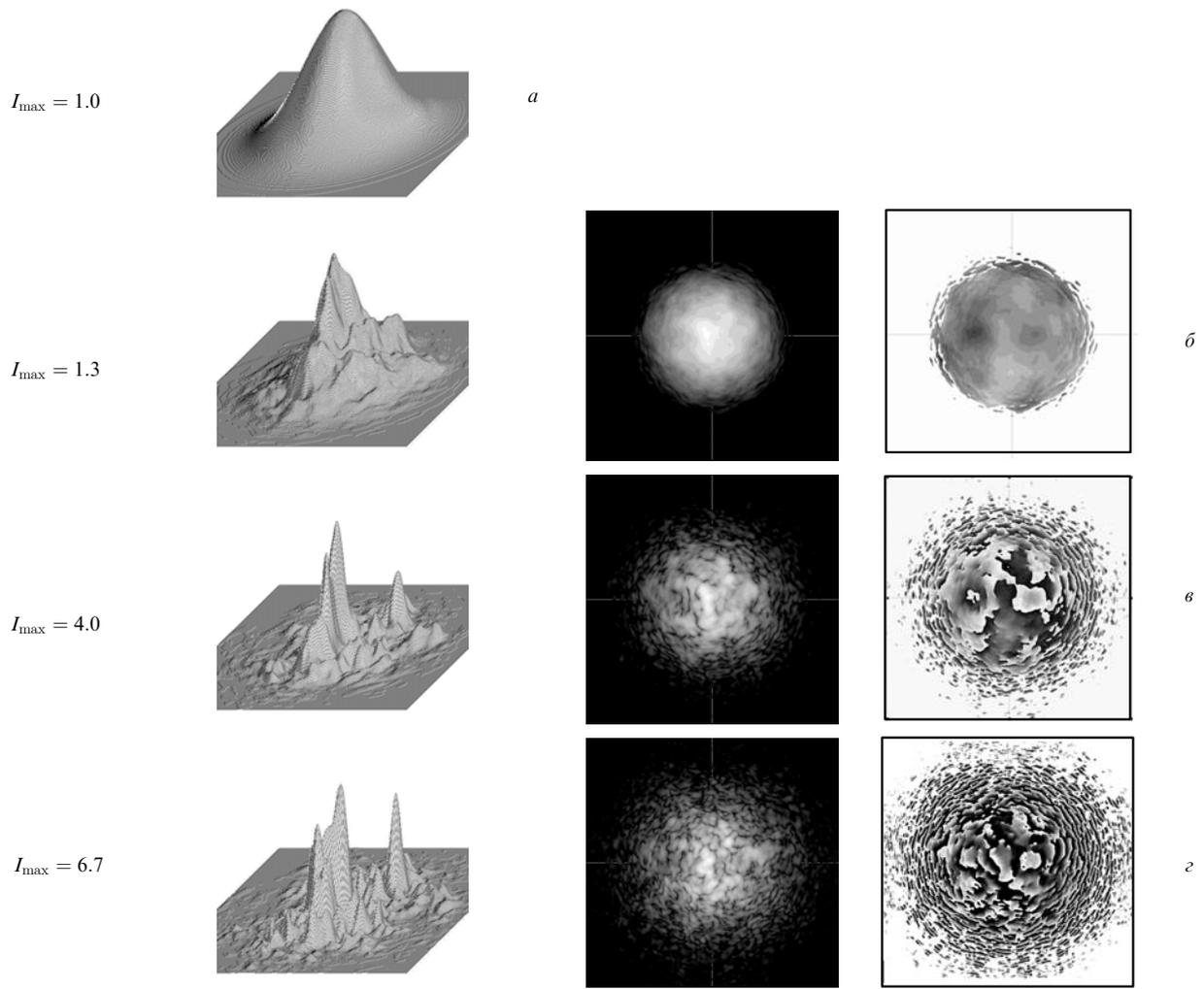


Рис.4. Трехмерные (слева) и двумерные (в центре) картины распределения интенсивности, а также распределения фазы (справа), полученные в плоскости адаптивного зеркала, для исходного гауссова пучка (а) и пучка, прошедшего через турбулентную среду, при $\beta^2 = 0.1$ ($C_n^2 = 0.1 \text{ м}^{-2/3}$) (б), 1.0 ($C_n^2 = 1.5 \text{ м}^{-2/3}$) (в) и 2.0 ($C_n^2 = 4 \text{ м}^{-2/3}$) (г).

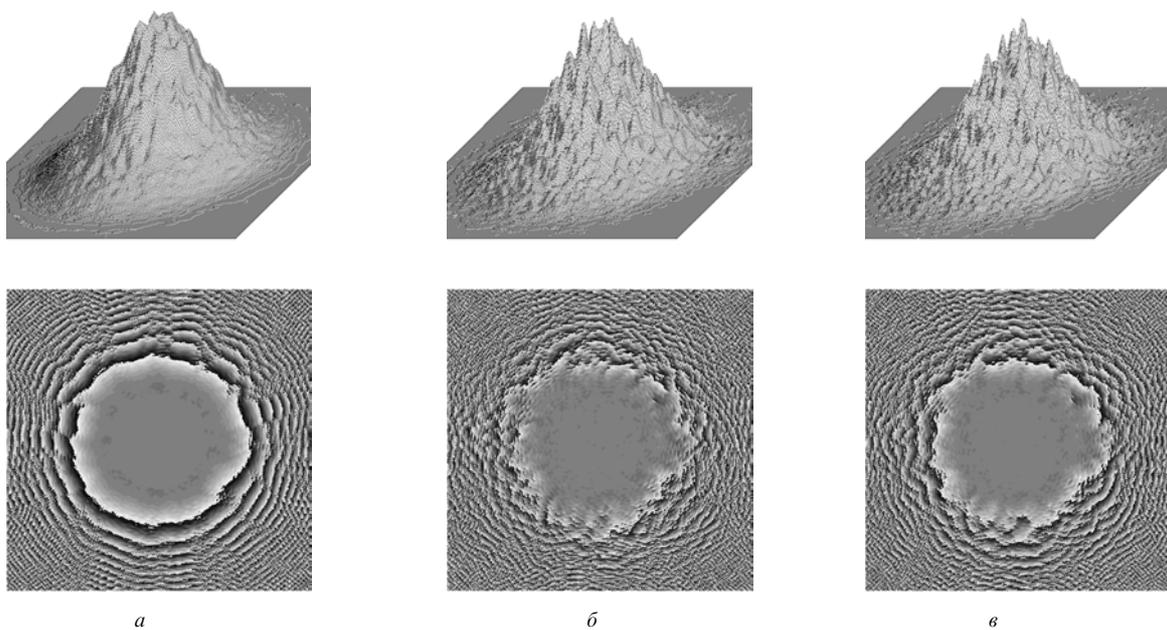


Рис.5. Картины распределения интенсивности (вверху) и фазы (внизу) пучка после ОВФ при $\beta^2 = 0.1$ ($C_n^2 = 0.1 \text{ м}^{-2/3}$) (а), 1.0 ($C_n^2 = 1.5 \text{ м}^{-2/3}$) (б) и 2.0 ($C_n^2 = 4 \text{ м}^{-2/3}$) (в).

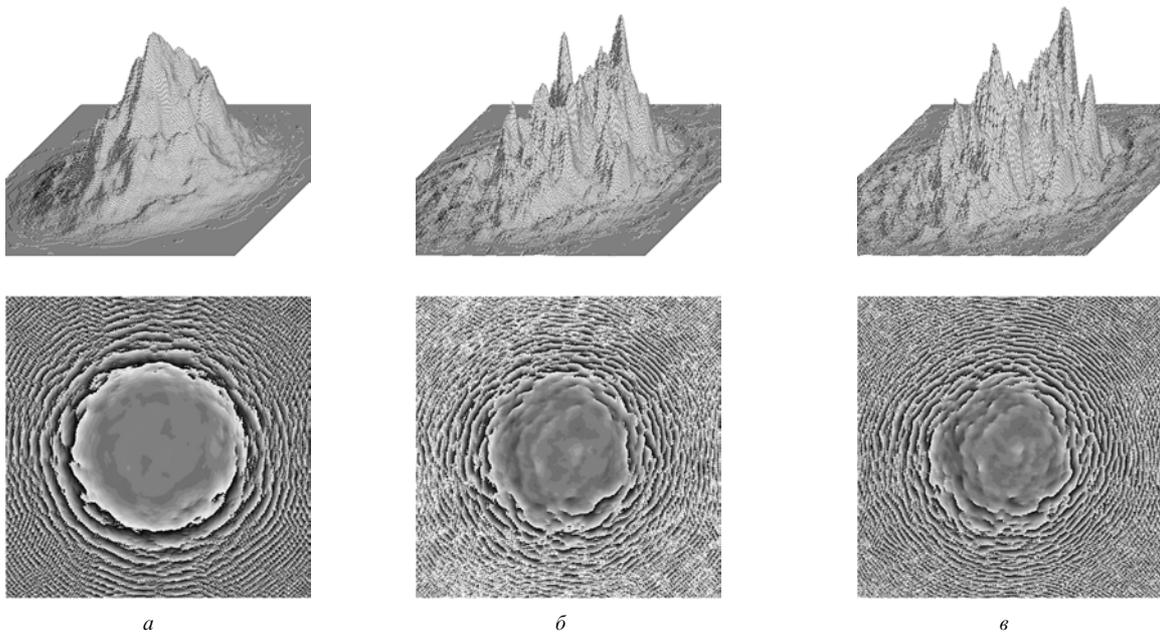


Рис.6. Картины распределения интенсивности (вверху) и фазы (внизу) пучка после ФС при тех же параметрах β^2 и C_n^2 , что и на рис.5.

пределение интенсивности имеет вид гауссова холма, покрытого мелкой рябью, тогда как для случая ФС наблюдается нагромождение пиков. При полном ОВФ фазовая поверхность обратного пучка почти плоская, за исключением его периферии, а при ФС имеют место ее сильные искажения, вплоть до дислокаций в центральной части пучка. Таким образом, можно сделать вывод о том, что замена сложного амплитудного распределения прошедшей волны ФС гауссовым амплитудным распределением вносит большую погрешность, чем ОВФ. Это может привести к наложению ограничений на соблюдение принципа взаимности, на котором основывается адаптивная оптика.

В связи с этим умение детально воспроизводить ВФ с дислокациями при ФС в случае формирования обратного пучка, используя информацию только о фазе пучка, прошедшего через турбулентную атмосферу, оказывается и не столь необходимым. Причина этого заключена в неиспользовании амплитудной информации [2, 3]. Подмена сложного амплитудного профиля пучка гладким гауссовым при детальном воспроизведении особенностей ВФ приведет к закачиванию большого количества энергии в те области, где ее быть не должно, и, в частности, в области с оптическими вихрями. Сразу заметим, что простое игнорирование дислокаций (использование сглаженной фазы, полученной с помощью среднеквадратичных реконструкторов ВФ) при ФС пучка с гауссовой амплитудой также не решает проблемы лишней энергии.

На рис.7 приведены зависимости ошибки обращения ε_0 и параметра E от структурной постоянной C_n^2 , рассчитанные для случая ФС при значениях порога $\Delta A = 0, 0.1$ и 0.2 . Порог ΔA измеряется в безразмерных единицах и характеризует уровень, начиная с которого амплитуда поля пучка при амплитудно-фазовом управлении полагается равной нулю. Если $\Delta A = 0$, то амплитуда воспроизводится во всех деталях. Если $\Delta A \neq 0$, то в точках, где измеренная амплитуда меньше порога, она считается равной нулю. Отметим, что картины распределения интенсивности и фазы пучка, полученные при обрезании

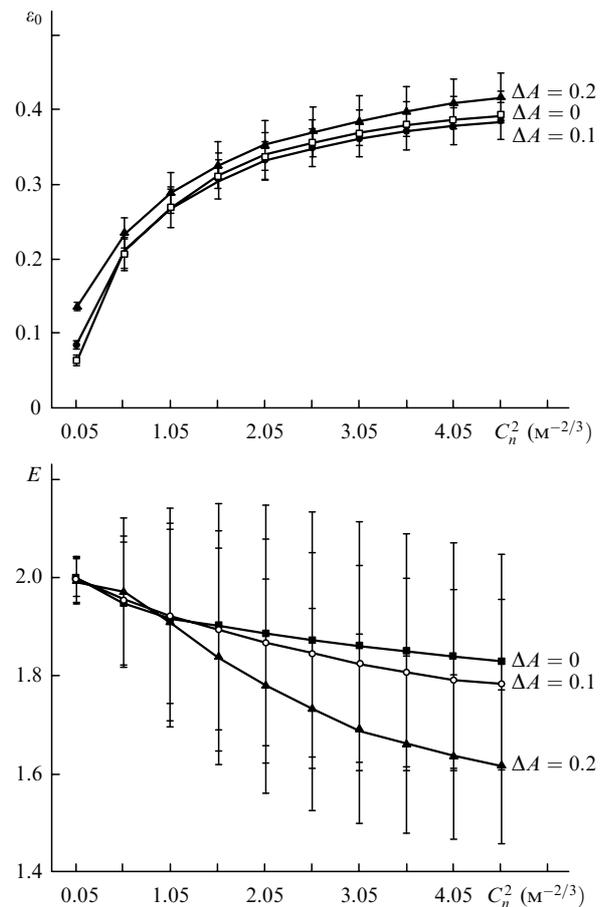


Рис.7. Зависимости ошибки обращения ε_0 и параметра E от C_n^2 при ФС для различных ΔA и числа реализаций $N = 100$.

поля по порогу $\Delta A = 0.1$ и без обрезания практически совпадают. Однако при более высоком пороге ($\Delta A = 0.2$) эти картины значительно различаются. Для сравнения на рис.8 показаны зависимости ошибки обращения ε_0 от параметра C_n^2 , рассчитанные для случая ОВФ при $\Delta A =$

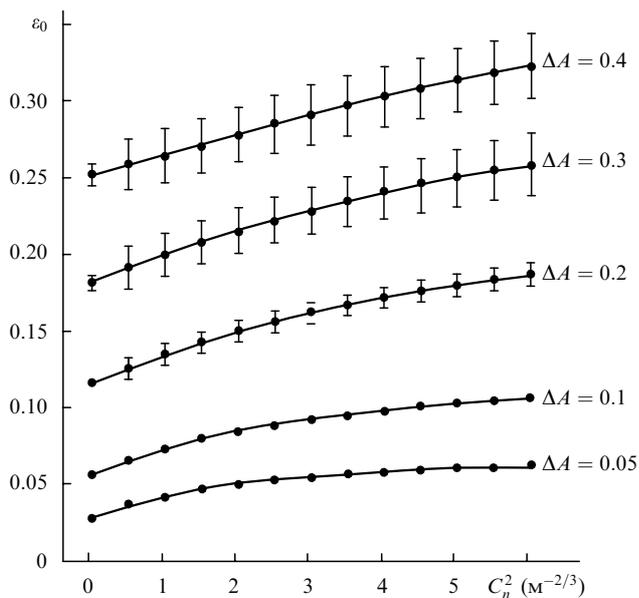


Рис. 8. Зависимости ошибки обращения ε_0 от C_n^2 при ОВФ для различных ΔA и числа реализаций $N = 200$.

0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4. Технически это можно было бы реализовать в системе из двух зеркал. Гибкое адаптивное зеркало воспроизводит сглаженный ВФ без дислокаций, тогда как сегментированное адаптивное зеркало формирует дыры в гауссовом пучке в тех местах, где должны быть области глубокого затухания.

Таким образом, показано, что замена сложного амплитудного распределения пришедшей волны гауссовым распределением при ФС на адаптивном зеркале вносит большую погрешность по сравнению с таковой при ОВФ. Это может привести к наложению ограничений на соблюдение принципа взаимности, на котором основывается адаптивная оптика [2, 3]. По сравнению с этим проблема неспособности детально воспроизводить на гибком адаптивном зеркале линий 2π -разрыва, связанных с наличием дислокаций ВФ, оказывается менее существенной. Однако она может быть успешно решена путем вывода областей глубокого затухания, содержащих дислокации, из канала адаптивной системы при соответствующем подборе порога ΔA .

4. Амплитудно-фазовое управление пучком в двухзеркальной адаптивной системе

Несмотря на достаточно большое число публикаций по данной теме [1, 4, 5], до сих пор нерешенной остается одна из основных теоретических проблем, возникающих при выполнении ОВФ в двухзеркальной системе [4, 6–10]. Нет точного быстродействующего алгоритма, позволяющего, управляя фазой пучка в одной плоскости, получить требуемое распределение амплитуды в плоскости, находящейся на некотором расстоянии от нее. Предлагаемые для решения этой задачи алгоритмы являются или итерационными [6, 7], или обладают невысокой точностью [4].

Здесь рассматривается еще один метод, позволяющий определить фазу пучка в плоскости первого зеркала, которая бы обеспечила требуемый амплитудный профиль в плоскости второго зеркала. На основе разработанного алгоритма выполнено исследование компенсации турбулентных искажений когерентного излучения,

проведено сравнение эффективности ОВФ с эффективностью чисто фазового управления [7].

Расчеты в этом разделе также были выполнены на основе методов численного эксперимента. При этом интенсивность атмосферной турбулентности характеризуется радиусом Фрида

$$r_0 = \left(0.423k^2 \int_0^L C_n^2(l) dl \right)^{-3/5}, \quad (4)$$

где L – толщина турбулентного слоя; k – волновое число излучения. Для характеристики эффективности компенсации возникающих искажений и остаточных искажений в настоящей работе использовался критерий фокусировки [1]

$$J(t) = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x, y) I(x, y, z_0, t) dx dy, \quad (5)$$

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиусом a_0 в плоскости z_0 . Здесь P_0 – полная мощность пучка; $I(x, y, z_0, t)$ – интенсивность излучения; $\rho(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/a_0^2]$ – апертурная функция.

ОВФ возможно в адаптивной системе [4, 7], включающей в себя два зеркала, разделенных промежутком, в котором пучок распространяется без искажений (рис. 9, 10). Первое зеркало 1 задает фазу пучка. При распространении в свободном пространстве изменения фазы приводят к изменениям амплитуды. Таким образом, в плоскости зеркала 2 (на входе в среду) достигается требуемое распределение интенсивности светового поля. Зеркало 2 компенсирует внесенные в фазу изменения 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 [6, 11] 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 и распространяющиеся на одинаковых трассах, приобретают одинаковые распределения амплитуды и фазы. Возможность реализации амплитудно-фазового управления с использованием этого свойства показана на рис. 9 и 10. Опорный пучок распространяется от плоскости регистрации (рис. 9). При падении на фазовый экран отличие амплитуды этого пучка от начальной гауссовой и его фазы от фазы волны с плоским ВФ (плоской фазы) обусловлено только дифракцией. Непосредственно за экраном амплитуда остается гауссовой, проход через экран приводит только к изменениям фазы. При падении опорного пучка на зеркало 2 уже проявляются амплитудные искажения. Если при этом зеркалом 2 выполнить сопряжение фазы опорного пучка, оставив его амплитуду без изменений, то в плоскости зеркала 1 получается точно такой же пучок, какой был непосредственно за искажающим экраном, т. е. имеющий гауссову амплитуду и некоторую фазу, отличающуюся от плоской. В плоскости зеркала 1 опорный пучок заменяется прямым, фаза которого является сопряженной относительно фазы

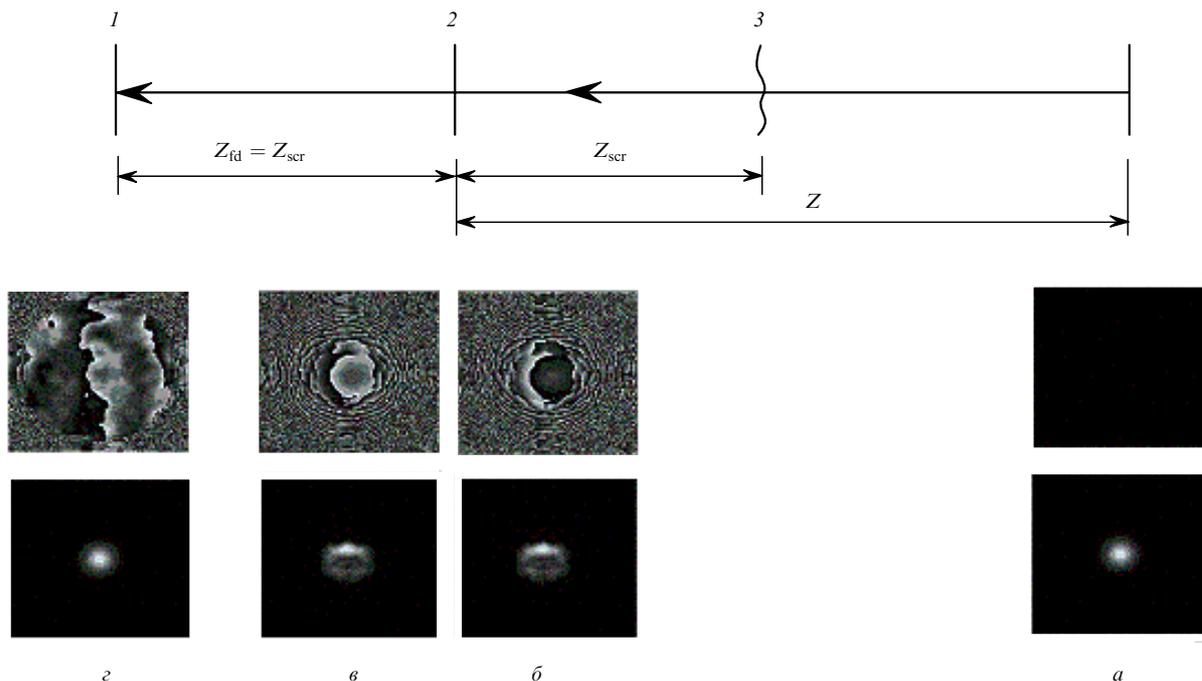


Рис.9. Распространение опорного пучка в двухзеркальной адаптивной системе (искажения моделируются одним экраном): фаза (вверху) и амплитуда (внизу) опорного пучка в плоскости регистрации (a), в плоскости зеркала 2 до (\bar{b}) и после (\bar{b}) сопряжения, а также в плоскости зеркала 1 (z); 3 – фазовый экран.

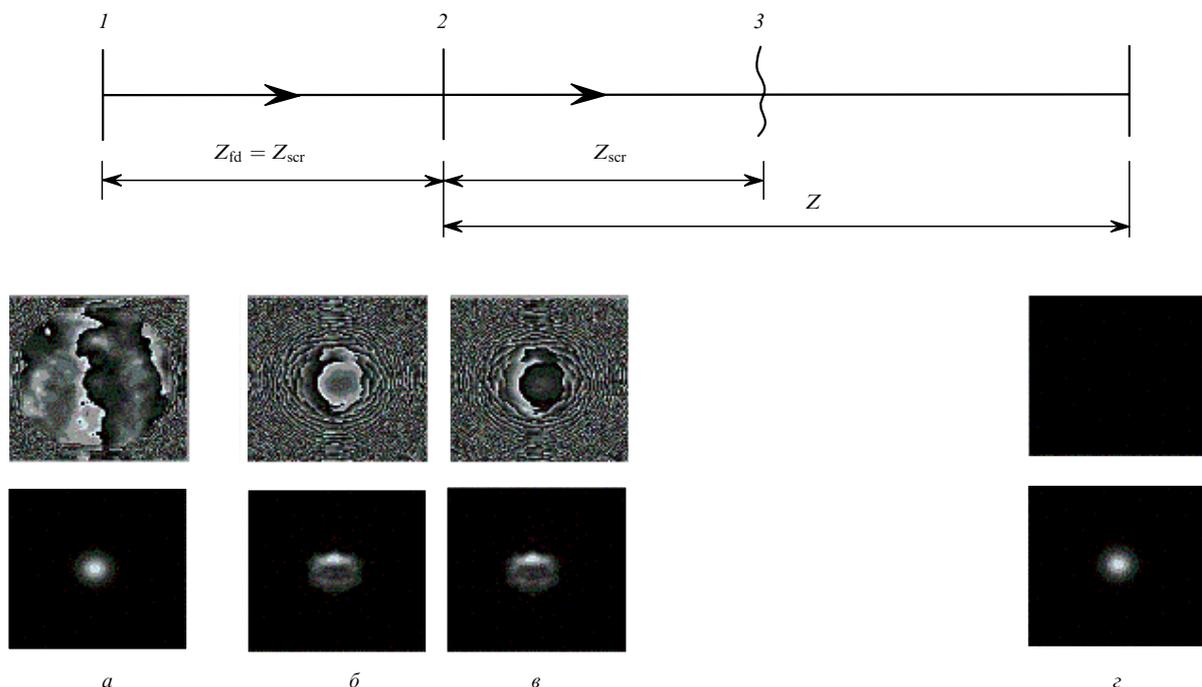


Рис.10. Распространение прямого пучка в двухзеркальной адаптивной системе (искажения моделируются одним экраном): фаза (вверху) и амплитуда (внизу) прямого пучка в плоскости зеркала 1 после коррекции (a), в плоскости зеркала 2 до (\bar{b}) и после (\bar{b}) сопряжения, а также в плоскости регистрации (z); 3 – фазовый экран.

опорного, а амплитуда – гауссовой (рис.10). Теперь выполняются все требования принципа оптической обратимости. В плоскости зеркала 2 амплитудное распределение получается таким же, как у опорного пучка, а фаза задается сопряженной относительно фазы опорного.

Следующая задача, рассматриваемая в настоящей работе, – реализация коррекции распределенной турбулен-

тной линзы [11 – 13]. Решение проводится на основе предположения о том, что искажения пучков, проходящих через один фазовый экран, который расположен в середине трассы, приблизительно равны искажениям пучков, проходящих через набор одинаковых фазовых экранов. Этот тезис подтверждается данными, представленными для указанных двух случаев в табл.1 и 2. В этих

Табл.1. Параметры пучка, полученные при моделировании турбулентности одним экраном, расположенным в середине трассы ($Z = 0.5$).

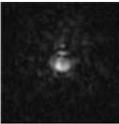
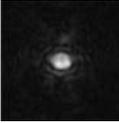
r_0 (м)	J	σ	X_c/a_0	Y_c/a_0
0.1	0.28	1.40	-0.22	0.10
0.08	0.25	1.48	-0.27	0.12
0.06	0.21	1.60	-0.34	0.16
0.04	0.15	1.80	-0.47	0.22
0.02	0.08	2.59	-0.83	0.38

Табл.2. Параметры пучка, полученные при моделировании турбулентности распределенной линзой, состоящей из одинаковых экранов ($Z = 0.5$).

r_0 (м)	J	σ	X_c/a_0	Y_c/a_0
0.1	0.30	1.35	-0.25	0.12
0.08	0.27	1.40	-0.30	0.14
0.06	0.23	1.49	-0.37	0.18
0.04	0.17	1.64	-0.51	0.25
0.02	0.08	2.10	-0.84	0.43

Табл.3. Коррекция распределенной турбулентной линзы, моделируемой набором одинаковых экранов, в адаптивной системе с двумя зеркалами.

r_0 (м)	J	J_{cor}	ε_0 ($Z = 0.5$)	Распределение светового поля
-----------	-----	------------------	-------------------------------	------------------------------

0.005	0.002	0.341	0.66	
0.01	0.039	0.462	0.46	
0.05	0.192	0.531	0.13	
0.1	0.292	0.532	0.07	

Примечание: J_{cor} – значение критерия, полученные при управлении пучком.

таблицах приводятся значения критерия J , энергетического радиуса пучка $\sigma(t)$ и смещений энергетического центра X_c и Y_c по осям, перпендикулярным направлению распространения:

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

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

Табл.4. Коррекция распределенной турбулентной линзы, моделируемой набором одинаковых экранов, на основе алгоритма ФС.

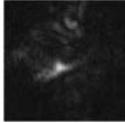
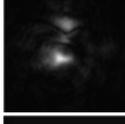
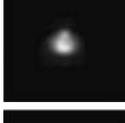
r_0 (м)	J	J_{cor}	ε_0 ($Z = 0.5$)	Распределение светового поля
0.005	0.002	0.105	1.06	
0.01	0.039	0.163	0.92	
0.05	0.192	0.452	0.32	
0.1	0.292	0.501	0.21	

Табл.5. Параметры пучка, полученные при компенсации распределенной турбулентной линзы, моделируемой набором разных экранов.

r_0 (м)	J	J_{cor}	ε_0 ($Z = 0.5$)
0.005	0.049	0.41	0.45
0.01	0.143	0.47	0.31
0.02	0.262	0.50	0.17
0.03	0.310	0.50	0.12

где r_{\perp} – радиус-вектор точки на плоскости; r_c – радиус-вектор энергетического центра тяжести пучка; Y_c определяется формулой, аналогичной (7). Результаты получены при разных турбулентных искажениях (при разных r_0). Из табл.1,2 видно, что все величины, введенные для того, чтобы охарактеризовать излучение, в этих двух случаях действительно являются близкими.

Поскольку коррекция одного экрана абсолютна, достаточно хорошая коррекция получается и при компенсации распределенной линзы, моделируемой набором одинаковых случайных экранов (табл.3). В этом случае не достигается абсолютная компенсация, но значения критерия, полученные в результате коррекции при малых радиусах Фрида, значительно выше, чем при использовании ФС (ср. табл.3 и 4). Дальнейшие неточности проявляются при компенсации распределенной линзы, состоящей из разных экранов, генерируемых с использованием набора случайных чисел. Однако и в этом случае результаты [13], полученные с использованием двухзеркальной системы (табл.5), оказываются достаточно хорошими.

5. Выводы

На основе приведенных результатов можно заключить, что предложенный метод амплитудно-фазового управления пучком не обеспечивает абсолютной компенсации распределенной турбулентной линзы, но полученные значения критерия фокусировки являются более высокими, чем при чисто фазовом управлении. Таким

образом, выполненные в работе расчеты показали большую эффективность амплитудно-фазовой коррекции по сравнению с чисто фазовой коррекцией. При этом амплитудное управление достигается только с использованием линейных преобразований поля искаженной волны.

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. *Принципы адаптивной оптики* (М.: Наука, 1985, с. 335).
2. Лукин В.П. *Атмосферная адаптивная оптика* (Новосибирск: Наука, 1986, с. 248).
3. Лукин В.П., Фортес Б.В. *Адаптивное формирование пучков и изображений* (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999, с. 211).
4. Высотина Н.В., Розанов Н.Н., Семенов В.Е., Смирнов В.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **28** (11), 42 (1985).
5. Лукин В.П., Чарнотский М.И. *Квантовая электроника*, **9** (5), 952 (1982).
6. Kanev F.Yu., Lukin V.P., Lavrinova L.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4341**, 135 (2000).
7. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. *Оптика атмосферы*, **4** (12), 1237 (1991).
8. Roggermann M.C., Lee D.J. *Appl. Opt.*, **37**, 4577 (1998).
9. Barcher J.D. *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (12), 423 (2001).
10. Выслоух В.А., Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **28** (11), 30 (1985).
11. Lukin V., Fortes B. *Appl. Opt.*, **41** (27), 1 (2002).
12. Лукин В.П. *УФН*, **173** (8), 11 (2003).
13. Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **15** (12), 1073 (2002).