

Восстановление трехмерного распределения показателя преломления атмосферы на основе методов адаптивной оптики

Ф.Ю. Канев^{1,2}, Е.И. Цыро^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. И.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский политехнический университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 5.02.2010 г.

Оценивается качество компенсации атмосферных искажений адаптивной системой, в которой длина волны основного генератора не совпадает с длиной волны бакеана. Рассматривается возможность восстановления показателя преломления в различных сечениях трассы распространения пучка при регистрации его параметров в плоскости наблюдения. Приводится алгоритм, позволяющий с использованием полученной информации повысить эффективность управления пучком в «двухцветной» системе.

Ключевые слова: адаптивная коррекция, управление на двух длинах волн; adaptive optics, correction for aberrations with two wavelengths.

Введение

В случаях, когда контур адаптивной коррекции входит в систему передачи световой энергии через атмосферу, длина волны опорного излучения может значительно отличаться от длины волны корректируемого пучка [1]. Связано это с тем, что к источнику, используемому для создания опорного сигнала, предъявляются требования, значительно отличающиеся от требований к основному лазеру. Это приводит к различию параметров генераторов, в частности к несовпадению длин волн.

В настоящей статье проблема управления на двух длинах волн решается в численном эксперименте с привлечением информации о трехмерном распределении показателя преломления, т.е. о фазовых набегах, задаваемых экранами, на трассе распространения пучка. Так как в большинстве реальных систем параметры пучка можно измерить только в плоскости наблюдения и на входе в искажающую среду, для восстановления экранов использовались именно эти данные.

Восстановление фазовых экранов выполнялось на основе алгоритма формирования требуемого амплитудного распределения излучения при управлении его фазой в плоскости, находящейся на некотором расстоянии от заданной. Отметим, что проблема формирования амплитуды является самостоятельной задачей, решение которой привлекает внимание исследователей как в России [2], так и за

рубежом [3–5]. Для решения используются различные алгоритмы, например авторы работы [5] вычисляют фазовый профиль по спектру излучения.

Несколько ранее нами был разработан алгоритм [6, 7], обладающий достаточно высокой точностью при использовании в условиях, характерных для атмосферной оптики (т.е. при задании амплитудного распределения пучков, испытывающих турбулентные и тепловые искажения).

В настоящей статье на основе методов численного моделирования рассматривается возможность применения алгоритма для восстановления фазовых экранов, задающих искажения.

1. Модель распространения пучка

При построении модели оптической системы полагалось, что основным искажающим фактором является атмосферная турбулентность, а тепловое самовоздействие и другие эффекты, оказывающие влияние на пучок, не учитывались.

Распределение амплитуды $E_0(x, y)$ одномодового пучка гауссовского профиля в плоскости апертуры источника задавалось формулой

$$E_0(x, y) = A_0 \exp[-(x^2 + y^2) / 2a_0^2], \quad (1)$$

в которой x, y — координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения; A_0 — значение амплитуды при $x = 0, y = 0$; a_0 — начальный радиус пучка. В приближении квазиоптики распространение излучения с комплексной амплитудой $E(x, y, z, t)$ в случайно-неоднородной слабо

* Федор Юрьевич Канев (kanev@iao.ru); Екатерина Ивановна Цыро.

поглощающей среде может быть описано дифференциальным уравнением вида [8]:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp} E + \frac{2k^2}{n_0} \tilde{n} E, \quad (2)$$

где z — координата в направлении распространения; $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — оператор Лапласа; \tilde{n} — случайное поле флуктуаций показателя преломления, обусловленных турбулентностью.

Пространственным масштабom задачи в направлении распространения, на который во всех приводимых далее (по всей статье) вычислениях нормировалась координата z , является дифракционная длина $z_d = ka_0^2$; k — волновое число. Нормировка координат x и y выполнялась на начальный радиус пучка a_0 .

Условия распространения пучка в турбулентной атмосфере определялись радиусом Фрида, связанным со структурной постоянной C_n^2 среды известной формулой [9]:

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

где L — длина трассы.

Лазерный пучок в плоскости наблюдения характеризовался критерием фокусировки J , пропорциональным мощности излучения, попадающего в пределы апертуры радиуса S_t :

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

где P_0 — полная мощность пучка; $\rho(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/S_t^2]$ — функция, задающая характер пропускания апертуры; $I(x, y)$ — распределение интенсивности.

Уравнение (2) обычно решается численно методом расщепления по физическим факторам [10], согласно которому распределенный слой искажающей среды представляется набором фазовых экранов и участков свободной дифракции между ними. Поэтому в модельной задаче восстановление трехмерного распределения показателя преломления в неоднородной атмосфере соответствует вычислению фазового набега, задаваемому каждым из экранов.

2. Метод восстановления фазовых экранов

Для восстановления фазовых экранов в настоящем исследовании используется алгоритм формирования требуемого амплитудного распределения излучения при управлении его фазой [6, 7]. Наиболее просто проблема решается при задании искажений только двумя экранами, расположенными равномерно на трассе (рис. 1).

Необходимая для восстановления информация — это распределение амплитуды и фазы в плос-

кости наблюдения и в плоскости излучателя. Так как от обеих плоскостей экраны отделены только участками свободной дифракции, параметры пучка в плоскостях экранов могут быть легко вычислены.

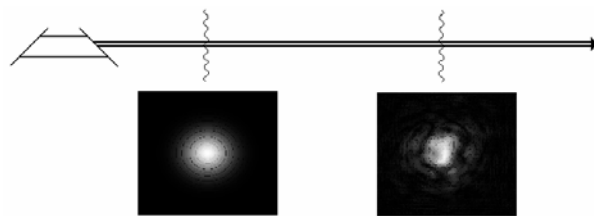


Рис. 1. Задание искажений двумя фазовыми экранами и распределение амплитуды излучения в плоскостях экранов

В первой из интересующих нас плоскостей пучок является гауссовским, во второй — искаженным, причем эти искажения обусловлены только первым экраном. Определяя фазовое распределение, которое обеспечивает изменение профиля пучка от гауссовского к требуемому, мы получаем фазовый набег, задаваемый первым экраном. Выполнение обратной операции (вычисление фазы, обеспечивающей изменение сложного распределения амплитуды в плоскости наблюдения к гауссовской форме, заданной в плоскости излучателя) позволяет вычислить параметры второго экрана.

Данные табл. 1, иллюстрирующие восстановление двух экранов, показывают, что описанный метод обеспечивает удовлетворительную точность при малой интенсивности искажений ($r_0 = 0,12$). С уменьшением радиуса Фрида точность восстановления уменьшается.

На трассе, где число экранов больше двух, известными являются параметры пучка только в плоскостях первого и последнего экранов. На основе этой информации можно попытаться восстановить первый и последний искажающие слои, но так как данные о промежуточных экранах полностью отсутствуют, точность операции невелика. Для трех экранов схема численного эксперимента представлена на рис. 2.

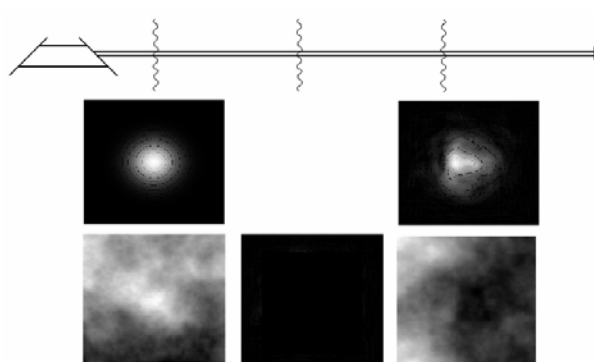


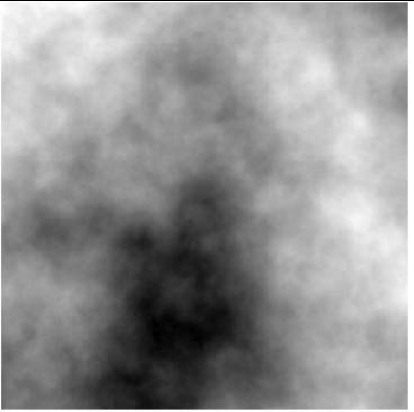
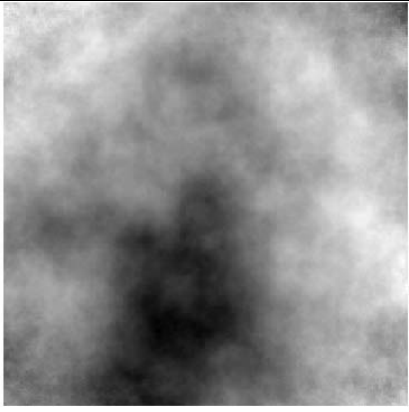

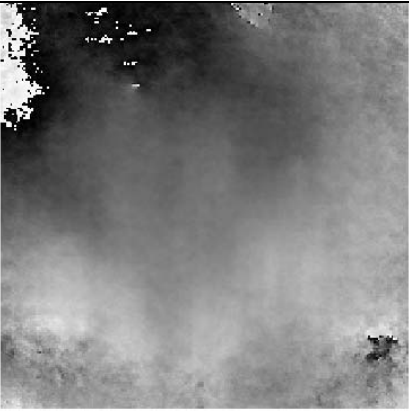

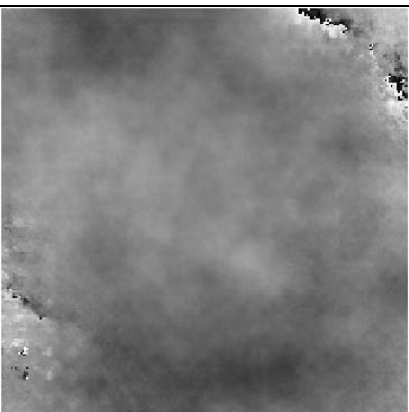


Рис. 2. Проблема, возникающая при восстановлении второго фазового экрана

Таблица 1

Точность восстановления двух фазовых экранов при различной интенсивности турбулентных искажений
 (r_0 – радиус Фрида, St – критерий Штреля, N – номер экрана)

r_0	St	N	Заданный фазовый экран	Восстановленный фазовый экран
0,12	0,98	1		
	0,94	2		
0,03	0,67	1		
	0,49	2		

И хотя качество процедуры невысокое, полученная информация о первом экране позволяет выполнить (приблизительно) его компенсацию и получить на следующем экране пучок с профилем амплитуды, близким к гауссовскому. При этом в плоскости регистрации мы наблюдаем искажения, обусловленные воздействием всех экранов, кроме первого, т.е. снова получаем задачу с двумя экранами (вторым и третьим), решение которой было рассмотрено выше. Это означает, что на данном этапе можно восстановить средний экран и, используя его, уточнить фазовые искажения, задаваемые первым и последним экранами. Затем средний экран восстанавливается с учетом первого и последнего и т.д., т.е. строится итерационный алгоритм, в котором последовательно вычисляются все экраны на трассе.

Точность разработанного алгоритма характеризуется результатами, представленными в табл. 2, где в первом ряду изображений приводятся фазовые экраны (в примере их только три), расположенные на трассе в численной модели распространения пучка.

Во втором ряду — экраны, полученные на первой итерации, информация о среднем экране здесь недоступна. Средний экран восстанавливается в результате компенсации первого экрана, он появляется в третьем ряду изображений.

Качество восстановления характеризуется критерием Штреля, который при заданной интенсивности турбулентности является достаточно низким. В последнем ряду приведен результат уточнения всех экранов, критерий Штреля здесь увеличивается до значений, близких к единице, т.е. для задачи с тремя экранами алгоритм обеспечивает высокую точность восстановления показателя преломления на трассе распространения даже при достаточно высокой интенсивности турбулентности.

Разработанный метод можно применять и для вычисления четырех фазовых экранов. Здесь наблюдается точность не ниже, чем в предыдущем случае, но компенсация третьего слоя достигается только на основе амплитудно-фазового управления пучком, при этом необходимое число итераций увеличивается, т.е. быстрое действие всей оптической системы уменьшается.

Для трассы с большим числом экранов была оценена точность восстановления первого и последнего из них и установлено, что значения критерия Штреля в этой задаче в большей степени зависят от радиуса Фрида (интенсивности турбулентности), чем от числа искажающих слоев, что позволяет рассчитывать на удовлетворительные результаты применения представленного метода для вычисления большого числа экранов.

В заключение отметим, что восстановление показателя преломления на трассе распространения пучка достигается на основе информации о распределении светового поля в плоскости излучающей апертуры и плоскости наблюдения. В представленном методе необходимым является использование адаптивной системы амплитудно-фазового управления.

3. Использование информации о распределении показателя преломления на трассе для реализации адаптивного управления в «двухцветной» адаптивной системе

Разработанная методика восстановления фазовых экранов позволяет вычислять скорости ветра в различных сечениях трассы, определять структурную постоянную атмосферы, выполнять фокусировку пучка в плоскость, не совпадающую с плоскостью опорного источника. Одна из возможностей применения алгоритма — это использование трехмерного распределения показателя преломления для повышения эффективности управления излучением в «двухцветной» адаптивной системе, т.е. когда длины волн опорного и корректируемого пучков являются различными. Известно [1], что в этом случае эффективность коррекции искажений значительно снижается. Как будет далее показано, применение рассчитанных экранов позволяет решить эту проблему и добиться высокого качества компенсации турбулентных искажений при значительном отличии длин волн пучков, используемых в адаптивной системе.

В численных экспериментах, результаты которых представлены в настоящей статье, координата в направлении распространения пучка нормируется на дифракционную длину Z_d и все расстояния определяются как

$$Z = z/Z_d = z\lambda/2\pi a_0^2.$$

Из формулы видно, что изменение длины волны излучения приводит к изменению нормированных дистанций, причем зависимость является прямо пропорциональной. Поэтому даже в случае, когда опорный и корректируемый пучки проходят по одному и тем же неоднородностям, изменение расстояния, выраженного в дифракционных длинах, вызывает изменение характера искажений, испытываемых излучением. Это иллюстрируется на рис. 3, где показаны амплитудные распределения для пучков с различными длинами волн, зарегистрированные после прохождения одинаковых в физическом пространстве трасс.

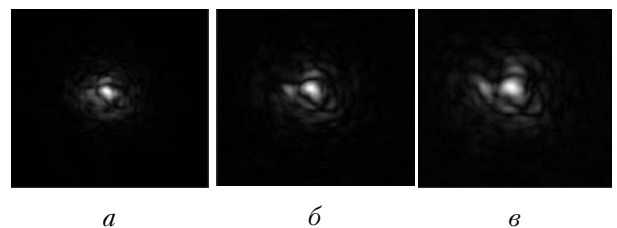

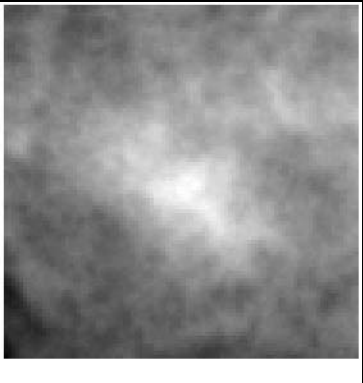

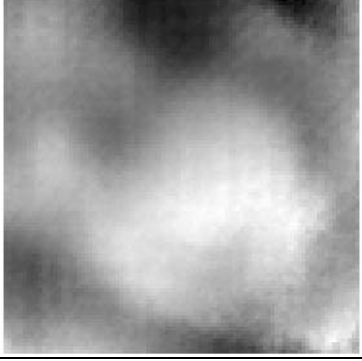
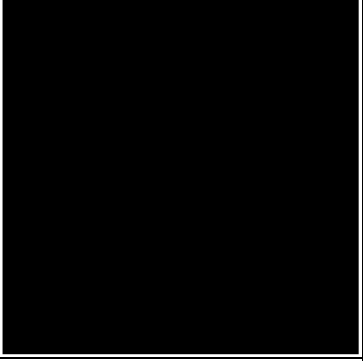
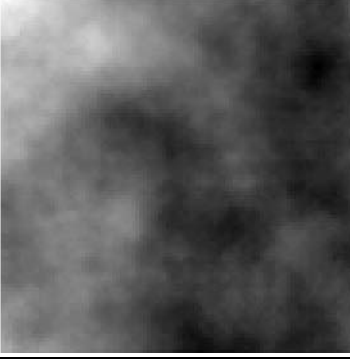
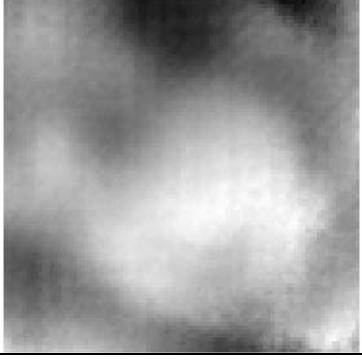
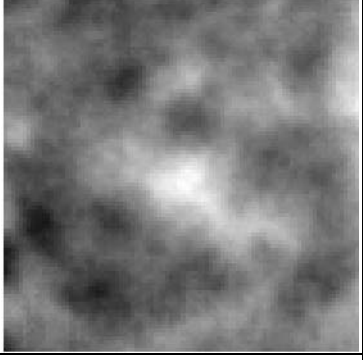
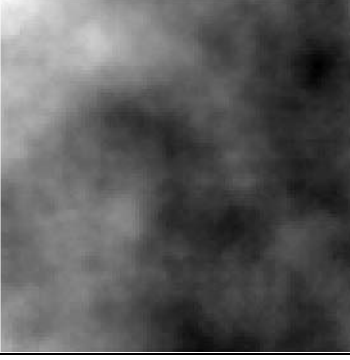
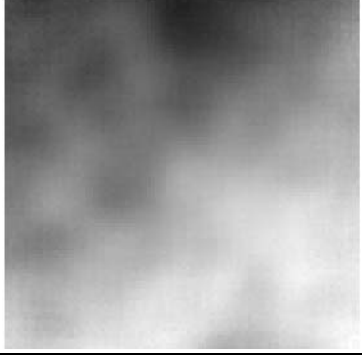
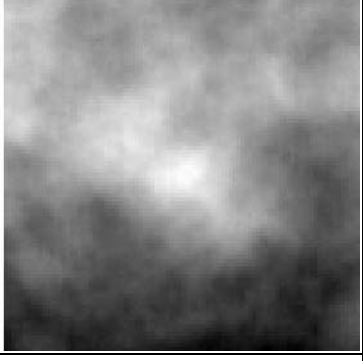



Рис. 3. Распределение амплитудного профиля гауссовского пучка, прошедшего различные расстояния в искажающей среде, выраженные в дифракционной длинах; $Z = 0,3$ (а), $0,5$ (б) и $0,7$ (в)

Восстановление трех фазовых экранов при использовании итерационного алгоритма.
 Параметры задачи: $Z = 0,5$; $r_0 = 0,03$

Номер экрана	1	2	3
Заданные экраны			
Восстановление 2-го и 3-го экранов			
Критерий Штреля	0,263	0,000	0,334
Восстановление 2-го экрана			
Критерий Штреля	0,263	0,267	0,334
Результат применения итерационного алгоритма			
Критерий Штреля	0,725	0,736	0,838

Из рис. 3 следует, что при отличии длин волн опорного и корректируемого пучков информация, используемая для организации адаптивного управления, не отражает условия распространения «прямого» пучка, в таких случаях вполне естественным является уменьшение эффективности управления.

Данные, характеризующие использование для коррекции атмосферных искажений алгоритма обращения волнового фронта, реализованного в двухзеркальной адаптивной системе, представлены на рис. 4.

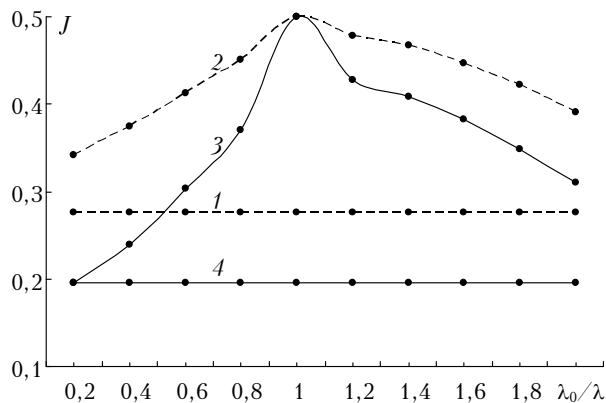


Рис. 4. Амплитудно-фазовое управление на двух длинах волн. Кривые 2 и 3 получены при коррекции искажений в системе с варьируемой λ при фиксированной длине волны корректируемого пучка λ_0 ; 1 и 4 соответствуют системе с разомкнутой обратной связью (без управления). $Z_0 = 0,6$; $r_0 = 0,03$ (1 и 2) и $0,05$ (3 и 4)

При получении результатов варьировалась длина волны опорного излучения λ , соответственно изменялась и нормированная длина трассы опорного пучка Z , тогда как корректируемый пучок всегда проходил одно и то же расстояние Z_0 .

Значения критерия фокусировки J , полученные в системе без управления, не зависят от отношения λ_0/λ , поэтому они представлены линиями, параллельными оси абсцисс (рис. 4, кривые 1 и 4). В то же время изменение длины волны опорного излучения при реализации коррекции приводит к уменьшению результирующих значений J , в некоторых случаях (при высокой интенсивности искажений) эти значения становятся практически такими же, как и регистрируемые без управления.

Одной из возможностей построения адаптивной системы, работающей на разных длинах волн, является восстановление показателя преломления на трассе на одной длине волны, а затем, на основе этих данных, вычисление корректирующего амплитудного и фазового профилей для другой длины. Методика была использована для реализации амплитудно-фазового управления при отличии частот корректируемого и опорного пучков. Данные для турбулентной среды при $r_0 = 0,03$ приведены на рис. 5.

В отличие от рис. 4 здесь варьировалась длина волны корректируемого пучка λ_0 , с увеличением которой изменялась нормированная длина трассы, и при отключенной обратной связи (без управле-

ния) значения критерия фокусировки уменьшались. В то же время при использовании информации о распределении показателя преломления на трассе во всем интервале изменения длин волн регистрировались практически одинаковые результаты коррекции (рис. 5, кривая 1), значительно превышающие значения критерия в системе без управления.

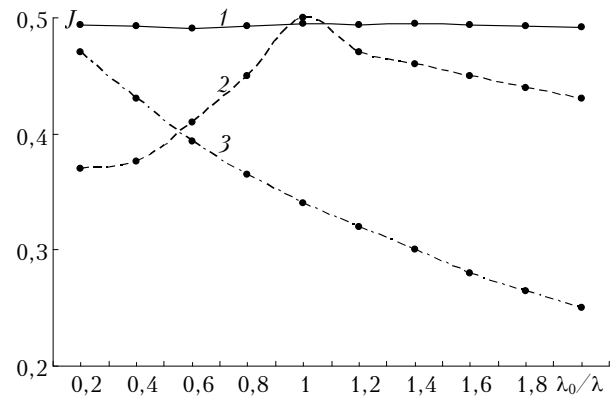


Рис. 5. Реализация управления с использованием (кривая 1) и без использования (2) информации о распределении показателя преломления на трассе распространения пучка. Кривая 3 получена без коррекции искажений. $r_0 = 0,03$, $Z = 0,6Z_d$, варьируемый параметр — λ_0

Описанный численный эксперимент показывает, что восстановление фазовых экранов на трассе распространения позволяет решить проблему реализации адаптивного управления в «двухцветной» адаптивной системе.

Заключение

Представлен метод восстановления трехмерного распределения показателя преломления на трассе распространения излучения. Показано, что при моделировании протяженного атмосферного слоя четырьмя фазовыми экранами точность восстановления является достаточно высокой.

Разработанный метод имеет широкую область возможных применений. В частности, он позволяет увеличить эффективность коррекции искажений в «двухцветной» адаптивной системе.

К недостаткам метода восстановления можно отнести: 1) необходимость использования адаптивной системы амплитудно-фазового управления волновым фронтом; 2) ограниченность его быстродействия, обусловленную применением итерационных алгоритмов.

1. Winocur J. Dual-wavelength adaptive optical systems // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 3711–3715.
2. Высотина Н.В., Розанов Н.Н., Семенов В.Е., Смирнов В.А. Амплитудно-фазовая адаптация на протяженных трассах с помощью гибких зеркал // Изв. вузов. Физ. 1985. Т. XXVIII. № 11. С. 42–50.
3. 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.
4. Shijie Hu, Bing Hu, Xuejun Zhang, Jiang Wu, Wenhao Jiang. Double-deformable-mirror adaptive optics

- system for phase compensation // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. N 12. P. 2638–2642.
5. *Xinyang Li, Min Li, Bo Chen, Changhui Rao, Wenhan Jiang.* Close-loop adaptive optics system based on liner phase retrieval technology // *Proc. of the conf. «The 7th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine».* Shatura, 2009. P. 92.
 6. *Mousey E.I., Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova H.A.* Новый алгоритм формирования требуемого распределения амплитуды при управлении фазой. Повышение эффективности двухзеркальной адаптивной системы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21. № 4. С. 636–640.
 7. *Kanev F.Yu., Makenova H.A., Mousey E.I.* Амплитудно-фазовое управление лазерным излучением и восстановление профилей пучка в различных сечениях трассы распространения // *Изв. вузов. Физ.* 2008. № 9/3. С. 88–89.
 8. *Выслоух В.А., Егоров К.Д., Кандидов В.П.* Численный эксперимент по фазовой компенсации теплового самовоздействия световых пучков // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1979. Т. XXII. № 4. С. 435–440.
 9. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
 10. *Марчук Г.И.* Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.

F.Yu. Kanev, E.I. Tsyro. **Reconstruction of three-dimension distribution of the index of refraction in the atmosphere by means of adaptive optics.**

The quality of adaptive correction for atmospheric aberrations is assessed in the system, where the wavelength of the main laser source differs from the wavelength of the beacon. A possibility is considered of the index of refraction reconstruction in different cross-sections of the propagation path, while parameters of the beam are registered only in the target plane. The algorithm is described which allows one to use the obtained information to increase the effectiveness of the laser beam control in a “two-color” adaptive optics system.