

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Л.Н. Лавринова

Исследование коррекции турбулентных искажений на основе фазового сопряжения при наличии дислокаций в фазе опорного пучка

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.10.2001 г.

Приведены результаты численных исследований коррекции турбулентных искажений лазерных пучков в условиях проявления дислокаций волнового фронта. Для регистрации особых точек использованы два алгоритма, выполнены оценки их точности. Рассмотрено управление пучком на основе фазового сопряжения. При анализе коррекции в качестве исполнительного элемента были использованы гибкое зеркало и идеальный корректор, позволяющий практически без ограничений воспроизвести фазовую поверхность. Выполнено сравнение эффективности компенсации турбулентности для этих двух типов корректоров. Указаны особенности, возникающие при использовании зеркала в адаптивной системе.

Введение

В настоящей статье на основе методов численного эксперимента рассмотрено адаптивное управление лазерным пучком, прошедшим слой турбулентной среды, выполнено сравнение эффективности коррекции искажений с использованием идеального корректора, позволяющего восстановить волновой фронт без каких либо ограничений, и адаптивного зеркала, моделируемого тонкой упругой пластинкой.

Как известно из литературных источников, при распространении когерентного излучения в атмосфере в тонкой структуре полей появляются фазовые сингулярности (называемые иногда дислокациями), развитие которых объясняется интерференцией между различными участками оптического поля [1]. Несмотря на то что согласно имеющейся классификации различается несколько типов сингулярностей, общее условие их существования является одинаковым – это наличие изолированных нулей интенсивности, т.е. точек, в которых действительная и мнимая части комплексной амплитуды поля равны нулю, а фаза, как следствие, не определена. Отмечено [2], что наиболее известные винтовые дислокации или оптические вихри ведут себя, в некоторой степени, подобно заряженным частицам. Они могут вращаться вокруг оси пучка, сходиться друг с другом, расходиться и уничтожаться при столкновении. Считаются возможными преобразования одних типов дислокаций в другие, например краевых в винтовые, краевых в дислокации смешанного крае-винтового типа и т.д.

Численный анализ интерференции поля от нескольких источников плоских или сферических волн [3, 4] дает возможность локализовать дислокации, определить их свойства, классифицировать, но не позволяет проследить за процессами их возникновения

и аннигиляции. Динамика этих процессов была рассмотрена при решении задачи дифракции пучка с искаженным волновым фронтом [5], в задаче нелинейной рефракции пучка с первоначально параболическим фазовым профилем [6, 7], при решении ряда задач по исследованию поведения спекл-поля в случайно-неоднородной среде [8, 9]. В целом можно сказать, что хотя исследованию фазовых сингулярностей в настоящее время посвящается достаточно большое количество работ, ряд проблем, связанных с особенностями адаптивной коррекции в этих условиях, до сих пор не является достаточно хорошо изученным [10]. По-видимому, к актуальным современным задачам можно отнести исследование влияния дислокаций на эффективность управления и создание оптимального корректора волнового фронта. Эти проблемы рассматриваются в настоящей статье.

1. Турбулентные искажения пучка на трассе распространения

Распространение пучка в случайно-неоднородной атмосфере описывалось параболическим уравнением [11]:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + 2k^2 \tilde{n}(x, y)E, \quad (1)$$

где E – комплексная амплитуда поля; z – направление распространения; x, y – координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения; k – волновое число. При численном решении уравнения (1) продольная координата была нормирована на дифракционную длину $Z_d = ka_0^2$, поперечные координаты на начальный радиус пучка a_0 , $\tilde{n}(x, y)$ – случайное поле флуктуаций показателя преломления,

характеризуемое структурной функцией $D_n(\rho)$ [12], соответствующей закону $2/3$

$$D_n(\rho) = C_n^2 \rho^{2/3}, \quad (2)$$

C_n^2 – структурная постоянная, $\mathbf{p} = (x, y)$; $\rho = |\mathbf{p}|$ – координаты точки. Спектральная плотность флуктуаций $\Phi_n(\kappa)$ описывалась моделью Кармана

$$\begin{aligned} \Phi_n(\kappa) &= 0,489 r_0^{-5/3} (k_0^2 + k_m^2)^{-11/6}; \\ r_0 &= (0,423 k^2 \int_0^L C_n^2(l) dl)^{-3/5}; \\ k_0 &= 2\pi / l_0, k_m = 2\pi / L_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь r_0 – радиус Фрида, величина, используемая в данной статье для характеристики турбулентности; l_0 , L_0 – внутренний и внешний масштабы турбулентности соответственно; L – толщина турбулентного слоя. В используемой численной модели турбулентность была представлена случайным фазовым экраном, расположенным на трассе распространения пучка (рис. 1, а). Положение экрана варьировалось, в частности расчеты

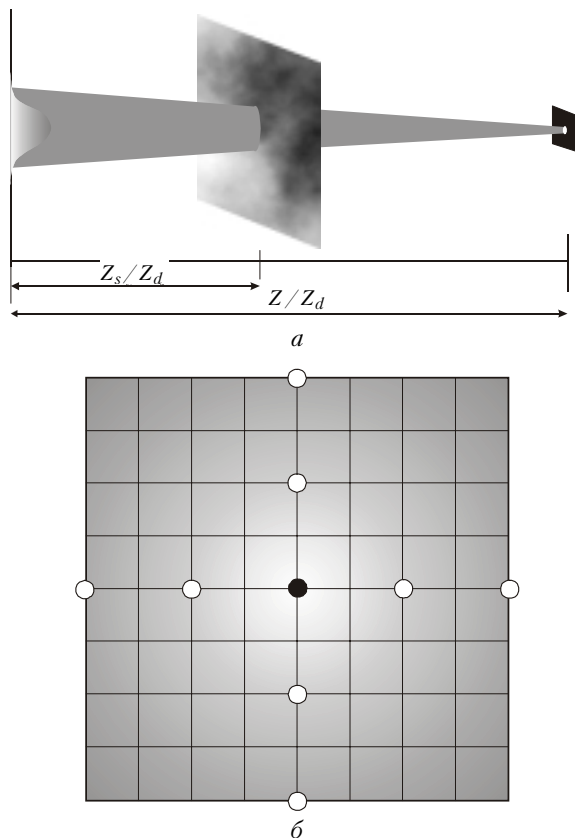


Рис. 1. Сценарий численного эксперимента по локализации дислокаций (а) и модель упругого зеркала, входящего в адаптивную систему фазового сопряжения (б)

были выполнены для экрана, расположенного непосредственно в плоскости передающей апертуры ($Z_s = 0$) и в середине трассы ($Z_s = 0,5Z$). При управлении пучком в плоскости наблюдения регистрируется критерий фокусировки

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

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

Одна из реализаций случайного экрана и соответствующее распределение интенсивности пучка, прошедшего этот экран, показаны на рис. 2.

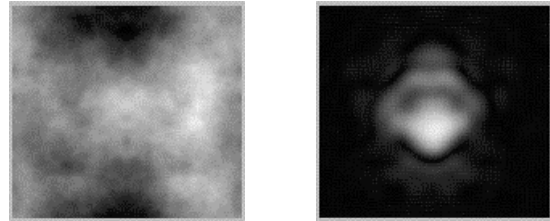


Рис. 2. Турбулентный экран, помещенный на трассе распространения пучка, и распределение интенсивности пучка

В качестве исполнительного элемента в адаптивной системе использовались идеальный корректор и упругое зеркало с 9 сервоприводами, представленное на рис. 1, б. Деформации зеркала $W(x, y)$ описывались уравнением бигармонического типа [13]:

$$D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial^2 x \partial^2 y} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) = f(x, y), \quad (4)$$

где $f(x, y)$ – поперечная распределенная нагрузка; $D = Eh^3 / [12(1 - \sigma^2)]$ – цилиндрическая жесткость; σ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга; h – толщина пластины. Уравнение решалось методом конечных элементов [14].

Управление пучком было реализовано на основе алгоритма фазового сопряжения [15], согласно которому фаза пучка в плоскости передачи

$$\varphi(x, y) = -\psi(x, y), \quad (5)$$

$\psi(x, y)$ – фаза опорного пучка.

2. Алгоритмы регистрации дислокаций

Известно [7], что наличие дислокаций в фазовом профиле опорного пучка существенно влияет на эффективность коррекции турбулентных искажений при использовании в качестве исполнительного элемента гибкого зеркала с непрерывной отражающей поверхностью. Поэтому для оценки эффективности компенсации искажений необходимы анализ закономерностей зарождения дислокаций, выявление зависимости их числа и точек локализации от параметров среды и длины трассы распространения.

Для проведения подобных исследований были использованы два алгоритма регистрации особых точек волнового фронта. Согласно первому в плоскости наблюдения рассматривалось распределение интенсивности пучка, прошедшего турбулентный слой. В этом распределении определялись точки с нулевой

интенсивностью, затем в фазовом профиле находились точки, соответствующие нулям интенсивности и вычислялось приращение фазы при обходе точек по замкнутому контуру. Если при вычислении приращения наблюдался скачок, приблизительно равный 2π , то полагалось, что точка является дислокацией.

Во втором алгоритме исследовался только фазовый профиль пучка. Алгоритм был основан на предположении о том, что в области дислокаций фаза имеет только один разрыв величиной 2π и является топологически непрерывной и монотонно возрастающей во всех остальных точках контура, окружающего дислокацию. По этим признакам проверялись все точки центральной области поверхности. Здесь нужно отметить, что исследования были выполнены на основе численных методов, согласно которым непрерывные функции амплитуды и фазы представляются сеточными аналогами. При дискретном представлении методы имеют ограниченную точность, в частности нужно учитывать, что нули интенсивности могут попадать между узлами сетки, т.е. нулевые точки не регистрируются с абсолютной достоверностью. Поэтому при реализации первого алгоритма в распределении интенсивности определялись не нули, а точки локальных минимумов.

Следующим источником ошибок является случайный шум, возникающий на краях расчетной сетки при задании экспоненциальной функции и выполнении преобразования Фурье. Именно наличием этого шума можно объяснить то, что плотность дислокаций на краях сетки на несколько порядков превышает их плотность в центральной области. Для устранения этого фактора особые точки вычислялись только в центральной области, равной приблизительно двум энергетическим радиусам пучка.

Точность определения особых точек в фазовом профиле пучка на основе двух приведенных алгоритмов иллюстрируется на рис. 3. Визуально достаточно хорошо заметно, что практически все дислокации,

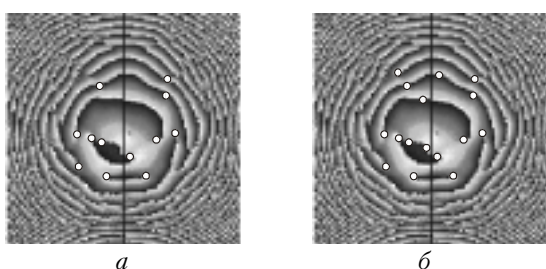


Рис. 3. Фазовый профиль пучка, распространяющегося в турбулентной среде, и точки дислокаций, определяемые с использованием двух алгоритмов

локализованные в центральной области, регистрируются алгоритмами. Но в обоих случаях несколько точек, не являющихся сингулярными, отмечаются на фазовой поверхности. Число таких точек во втором алгоритме (рис. 3, б) больше, чем в первом (рис. 3, а). Объяснить это можно только ошибками, связанными с дискретным представлением функций, полностью исключить которые нам не удалось (для повышения достоверности расчетов использовались сетки различных размерностей и все переменные программы были опи-

саны с двойной точностью). В целом можно сказать, что оба алгоритма дают несколько завышенное количество дислокаций и, по-видимому, второй алгоритм имеет меньшую достоверность по сравнению с первым.

Статистика дислокаций на трассе распространения пучка иллюстрируется данными, приведенными на рис. 4. На представленных графиках количество дислокаций показано в различных сечениях трассы при

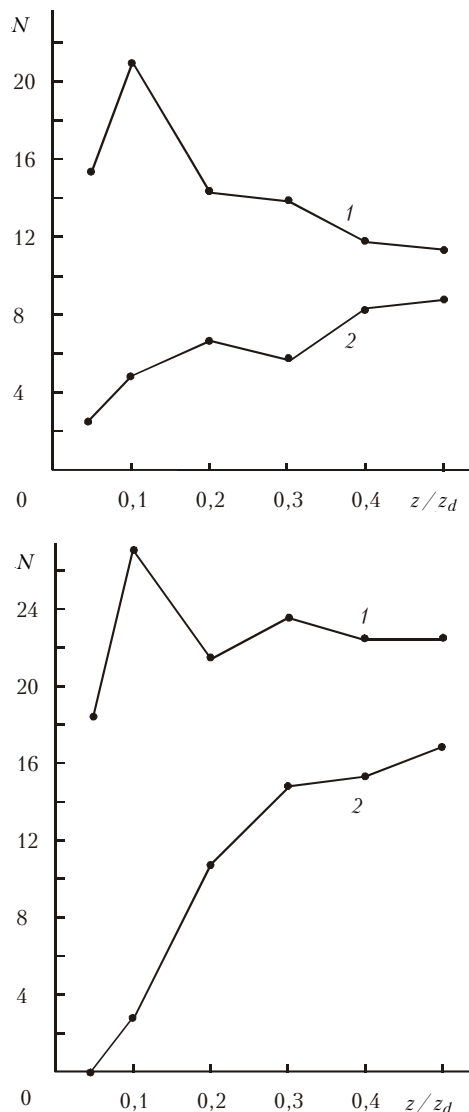


Рис. 4. Число дислокаций в различных сечениях трассы распространения для двух алгоритмов в зависимости от продольной координаты z . Кривая 1 – $r_0 = 0,05$; кривая 2 – $r_0 = 0,1$

различных характеристиках фазового экрана (различных радиусах Фрида). По графикам можно проследить следующие закономерности: количество особых точек увеличивается с увеличением интенсивности турбулентности; при высокой интенсивности искажений число дислокаций резко возрастает с увеличением длины трассы, при меньшей интенсивности наблюдается более плавный рост; в обоих случаях при увеличении длины трассы количество дислокаций не возрастает неограниченно, а стремится к некоторому постоянному значению (имеет тенденцию к насыщению).

3. Влияние дислокаций на эффективность фазового сопряжения

При реализации алгоритма сопряжения фаза опорного пучка в плоскости передающей апертуры задавалась следующим образом:

$$\varphi(x, y) = \text{Arg}[E(x, y)].$$

Поскольку аргумент комплексного числа не является однозначной функцией, то это выражение можно использовать только для поверхностей, определенных в интервале $[-\pi, +\pi]$, на границах интервала рассчитанная фаза изменяется скачкообразно от $+\pi$ до $-\pi$ (или наоборот от $-\pi$ до $+\pi$). Для устранения этого ограничения необходимо получить полную фазу

$$\varphi(x, y) = \text{Arg}[E(x, y)] + 2\pi m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

т.е. определить целое число m для каждой из точек поля.

Исследуемая адаптивная система использовалась с двумя различными исполнительными элементами – идеальным корректором, позволяющим воспроизведение волнового фронта без ограничений, и гибким зеркалом, модель которого представлена на рис. 1, б. В последнем случае смещение каждого из сервоприводов задавалось равным фазовому сдвигу в соответствующей точке. Кроме этого, для точек закрепления приводов определялось число m , т.е. были учтены разрывы, вносимые функций Arg (выполнена «сшивка» поверхности). Необходимость выполнения «сшивки» иллюстрируется данными таблицы, в которую помещены значения критерия фокусировки J , получен-

Результаты (критерий фокусировки) коррекции турбулентности на основе фазового сопряжения, ДС

Без управления	Идеальное ФС	Зеркало без сшивки фазы	Зеркало со сшивкой фазы
0,26	0,51	0,10	0,40

ные для одной из реализаций фазового экрана без управления (первая колонка) и при фазовом сопряжении (2, 3, 4-я колонки) с использованием коллимированного опорного пучка. Коррекция выполнялась на трассе длиной $0,5Z_d$, при $r_0 = 0,1$, турбулентный экран в данных численных экспериментах был расположен в начале трассы, т.е. дислокации в области регистрации отсутствовали (между экраном и плоскостью регистрации расстояние равно нулю). Данные, помещенные в таблицу, показывают, что компенсация искажений в рассматриваемых условиях обладает высокой эффективностью при использовании идеального корректора (увеличение критерия фокусировки в два раза), тогда как зеркало без «сшивки» фазы не только не обеспечивает адаптивной фокусировки, но и приводит к уменьшению плотности световой энергии в плоскости наблюдения. При включении в алгоритм управления операции «сшивки» зеркало обеспечивает результаты, близкие к идеальному корректору (4-я колонка таблицы).

Для одной из реализаций фазового экрана данные, характеризующие эффективность коррекции,

представлены на рис. 5, а. Значения критерия фокусировки получены в результате управления при раз-

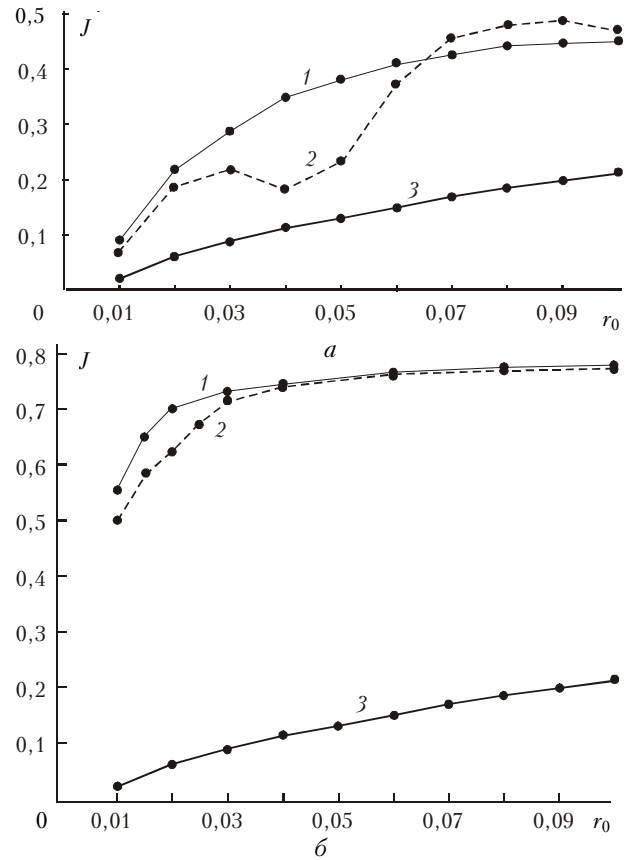


Рис. 5. Зависимость критерия фокусировки J от радиуса Фрида при управлении на основе фазового сопряжения. При сопряжении опорный пучок был взят коллимированным (а) и дефокусированным (б). Кривая 1 – анализируется идеальным корректором; 2 – в систему включено гибкое зеркало; 3 – адаптивное управление отсутствует

личной интенсивности турбулентных искажений (экран находился в середине трассы, что приводило к появлению дислокаций в плоскости передающей апертуры). В условиях, когда турбулентные искажения невелики (r_0 в интервале от 0,07 до 0,1), гибкое зеркало обеспечивало более высокие значения критерия по сравнению с идеальным. Объяснить это возможно наличием дислокаций в опорном сигнале и особенностями алгоритма «сшивки» поверхности. При «сшивке» определяется число m , значение которого зависит от числа разрывов фазы величиной 2π на прямой, соединяющей центр зеркала и точку расположения привода. При наличии особых точек это число имеет завышенное значение (разрывы обусловлены не только вычислением фазы как аргумента комплексного числа, но и дислокациями), поэтому привод зеркала смещается на большую величину, чем того требует алгоритм управления, в результате пучок «перифокусируется». Но так как опорный пучок коллимированный, а фазовое сопряжение сводит прямой пучок к таким же параметрам, что и опорный, то перифокусировка прямого пучка относительно опорного сигнала приводит к более высокой концентрации энергии излучения

в плоскости наблюдения. В области сильных искажений (r_0 в интервале от 0,01 до 0,07) при большом числе особых точек в фазе опорного пучка качество коррекции с использованием зеркала значительно ниже, чем с использованием идеального корректора.

Пределные значения критерия J (наиболее высокая эффективность коррекции) достигаются в том случае, когда в качестве опорного используется дефокусированный пучок. При этом в неискажающей среде в результате фазового сопряжения прямой пучок сводится к фокусированному. При наличии турбулентности на трассе с использованием идеального корректора получаются высокие значения критерия, а увеличение концентрации поля за счет перефокусировки при использовании зеркала принципиально невозможно.

Полученные в таких экспериментах данные представлены на рис. 5, 6. Для всех значений радиуса Фрида значения критерия в адаптивной системе, включающей зеркало, ниже, чем для идеальной. Особенно заметно уменьшение эффективности в области сильных флуктуаций, т.е. там, где число дислокаций максимально.

Усредненные по пятидесяти реализациям значения критерия J , полученные в результате управления, приведены на рис. 6. На графиках повторяются тенденции, характерные для отдельной реализации

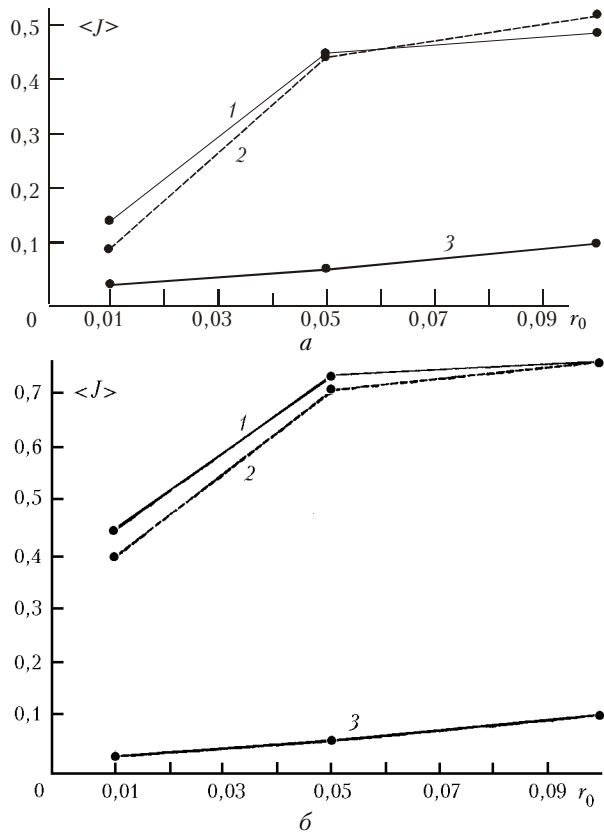


Рис. 6. Усредненные по 50 реализациям значения критерия фокусировки $\langle J \rangle$, полученные при управлении (экран в середине трассы). Опорный пучок коллимированный (а) и дефокусированный (б)

экрана. В частности, видно, что в первом случае при малой интенсивности турбулентности зеркало позволяет получить более высокие результаты (по-видимому,

из-за дислокаций на краях, приводящих к перефокусировке), с возрастанием турбулентных искажений эффективность коррекции при использовании зеркала падает, более высокие значения критерия обеспечивает идеальный корректор. Во втором случае (дефокусированный опорный пучок) значение критерия, полученное при использовании зеркала, ниже во всем диапазоне варьирования параметра r_0 .

Для подтверждения того, что немонотонность уменьшения критерия фокусировки на отдельных реализациях при увеличении интенсивности турбулентных искажений обусловлена именно дислокациями, были проведены численные эксперименты, в которых фазовый экран находился в плоскости передающей апертуры. В этом случае в фазе опорного пучка (излучение было дефокусированным) особые точки отсутствуют. Результаты управления для отдельной реализации и значения критерия, усредненные по 50 реализации, приведены на рис. 7. Видно, что при использо-

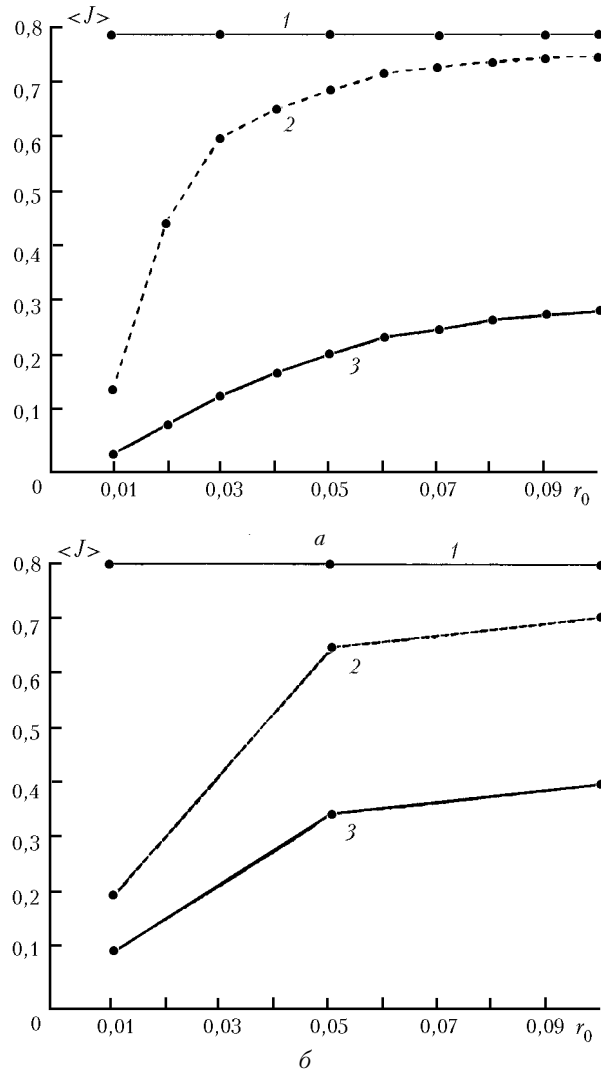


Рис. 7. Значения критерия фокусировки J при управлении для отдельной реализации (а) и усредненные по 50 реализациям $\langle J \rangle$ (б). Кривая 1 - анализируется идеальный корректор; 2 - в систему включено гибкое зеркало; 3 - адаптивное управление отсутствует

вании идеального корректора результаты адаптивной фокусировки не зависят от r_0 , т.е. искажения полностью скомпенсированы. При включении в систему зеркала значения критерия монотонно убывают с ростом интенсивности искажений и всегда ниже, чем результаты, полученные для идеального корректора.

В целом по приведенным данным можно сделать вывод, что при малой интенсивности турбулентных искажений и, соответственно, малом числе дислокаций зеркало с 9 приводами обеспечивает высокую эффективность адаптивной коррекции, сравнимую с эффективностью, достигаемой при использовании идеального корректора. При возрастании интенсивности искажений использование данного зеркала нецелесообразно. В этом случае необходимым является увеличение числа приводов корректора.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ по гранту № 00-02-17489.

1. *Berry M.* Singularities in waves and rays in Physics of Defects. Amsterdam, North-Holland, 1981. P. 457–542.
2. *Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* Nonlinear singular optics // Pure Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 301–311.
3. *Baranova N.B., Mamaev A.V., Pilipetskiy N.F., Shkunov V.V., Zel'dovich B.Ya.* Wave-front dislocations: topological limitations for adaptive systems with phase conjugation // J. Opt. Soc. Amer. 1983. V. 73. № 5. P. 525–528.
4. *Basistiy I.V., Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* Optical wave front dislocations and their properties // Opt. Commun. 1995. V. 119. P. 604–612.
5. *Aksenov V.P., Tikhomirova O.V.* Reconstruction of singular phase of optical speckle field from the measurements of wave-front slopes // Proc. SPIE. 1999. V. 3983. P. 101–108.

6. *Аксенов В.П., Банах В.А., Тихомирова О.В.* Потенциальные и вихревые свойства оптических спекл-полей // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 9. № 12. С. 1450–1455.
7. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* О влиянии дислокаций волнового фронта на нестабильность фазового сопряжения при компенсации теплового самовоздействия // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 3. С. 435–447.
8. *Майер Н.Н., Тартаковский В.А.* Дислокации фазы и минимально-фазовое разложение волнового фронта // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 3. С. 448–450.
9. *Майер Н.Н., Тартаковский В.А.* Световой пучок с азимутальной несущей в вакууме и неоднородной среде // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 11. С. 1169–1170.
10. *Аксенов В.П., Колосов В.В., Тартаковский В.А., Фортес Б.В.* Оптические вихри в неоднородных средах // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 10. С. 952–958.
11. *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.
12. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
13. *Огибалов П.М.* Изгиб, устойчивость и колебания пластинок. М.: Изд-во МГУ, 1958. 168 с.
14. *Кандидов В.П., Чесноков С.С., Выслоух В.А.* Метод конечных элементов в задачах механики. М.: Изд-во МГУ, 1979. 178 с.
15. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.

F.Yu. Kanev, V.P. Lukin, L.N. Lavrinova. **Study of correction of turbulent distortions based on phase conjugation in the presence of dislocations in the reference beam phase.**

Results of numerical studies of correction of laser beam turbulent distortions under conditions of wave front dislocations are presented. To record singular points, two algorithms were used and their accuracy was estimated. Beam controlling on the base of phase conjugation was considered. When analyzing the correction, a flexible mirror and ideal corrector were used as the control element, which allows reproduction of the phase surface almost with no limit. Efficiencies of the turbulence compensation by the two types of corrector were compared. Peculiarities, which appear due to the use of the mirror in an adaptive system, are pointed.