

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Н.А. Макенова

Регистрация фазового профиля когерентного излучения и реализация адаптивного управления лазерным пучком при наличии особых точек в волновом фронте

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.04.2002 г.

Рассмотрена компенсация турбулентных искажений пучков адаптивной системой с датчиком Гартмана. Управление реализовано в условиях проявления особых точек в фазовом профиле излучения. Для анализа влияния дислокаций на точность регистрации волнового фронта разработаны два алгоритма локализации особых точек. Первый алгоритм основан на анализе фазовой поверхности излучения и может быть использован только в численном эксперименте. Во втором дислокации определяются как точки ветвления интерференционных полос. Алгоритм может быть реализован экспериментально. Проведено сравнение точности алгоритмов. С их использованием получена статистика дислокаций на трассе распространения. Выполнен анализ эффективности фазового сопряжения с учетом ограничений, вносимых датчиком. Показано, что при наличии дислокаций управление теряет устойчивость. Предложен метод повышения устойчивости.

Введение

Для того чтобы цепь обратной связи в системе фазового сопряжения была замкнута, необходимо провести измерение фазового профиля опорного пучка [1]. На основе этих измерений и в зависимости от конкретной реализации алгоритма управления (известно несколько модификаций фазового сопряжения [2]) вырабатываются управляющие сигналы, которые подаются на исполнительный элемент. Поэтому одним из основных элементов адаптивной системы является устройство регистрации фазы. Обычно в качестве такого устройства используют датчик Гартмана [3].

Основные принципы построения датчика хорошо известны и достаточно полно описаны в литературных источниках [3 – 5]. Тем не менее остаются актуальными изучение особенностей работы прибора в различных условиях, влияния его параметров на точность воспроизведения волнового фронта, оптимизация настроек датчика.

Прежде всего практический интерес представляет выбор оптимального числа субапертур. Решение этой проблемы для адаптивной системы телескопа выполнено авторами [6], где определена зависимость функции рассеяния точки от количества элементов датчика. Еще одна задача – это выбор формы линз, формирующих фокусирующий элемент. Авторами [7] рассмотрены линзлеты с круглыми, квадратными, гексагональными субапертурами, а также сформированные полярными сегментами. В статье приведены данные по регистрации полиномов Цернике и фазового профиля пучка, искаженного в результате распространения в атмосфере. Наименьшие ошибки были отмечены

для датчика с квадратными линзами и с элементами в виде полярных клиньев.

Возможность расширения динамического диапазона предложена в работе [8], авторы которой предлагают сканирующий датчик, имеющий только одну субапертуру,двигающуюся в пределах области, где измеряется фаза. В этом случае регистрация смещения центраида выполняется всем светочувствительным элементом, а не только участком, соответствующим отдельной субапертуре. Недостатком метода является значительное уменьшение быстродействия.

Отдельно можно выделить проблему регистрации в условиях развития дислокаций, т.е. когда фаза опорной волны имеет разрывы. Анализ задачи проводится в [9], но радикальное решение авторы не предлагают, указывая на необходимость получения дополнительных результатов.

Приведенный выше краткий обзор литературы показывает, что невозможно считать полностью изученной работу датчика Гартмана в адаптивной системе. Оптимизация датчика и его использование для коррекции искажений пучков, для измерений волнового фронта при наличии особых точек – это области, исследования в которых должны быть продолжены. Решение некоторых из перечисленных задач выполнено в настоящей статье на основе методов численного эксперимента. В разделе 2 рассмотрены алгоритмы регистрации дислокаций, выполнено сравнение их точности, отмечены особенности проявления сингулярности точек на трассе распространения пучков в турбулентной атмосфере. В разделе 4 полученные результаты использованы при изучении коррекции искажений в системе, включающей датчик. Показано, в частности,

что наличие особых точек приводит к полному срыву адаптивного управления – эффективность коррекции при адаптации ниже, чем при выключенном контуре обратной связи. В статье рассмотрено возможное решение этой проблемы.

1. Модель распространения излучения и сценарий численного эксперимента

В используемой численной модели распространение пучка в турбулентной случайно-неоднородной атмосфере описывалось параболическим уравнением [10]:

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

где E – комплексная амплитуда поля; z – продольная координата; x, y – координаты в плоскости, перпендикулярной направлению распространения; k – волновое число. При 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 $D_n(\rho)$ [4], соответствующей закону 2/3:

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

где C_n^2 – структурная постоянная; $\rho = (x, y)$, $\rho = |\rho|$ – координаты точки. Спектр флуктуаций $\Phi_n(\kappa)$ описывался моделью Кармана

$$\Phi_n(\kappa, l) = 0,033 C_n^2(l) (\kappa_0^2 + \kappa_m^2)^{-11/6} e^{-\kappa^2/\kappa_m^2}, \quad (3)$$

$$\kappa_0 = 2\pi/L_0, \quad \kappa_m = 5,92/l_0,$$

l_0, L_0 – внутренний и внешний масштабы турбулентности соответственно. Для спектральной плотности модели, задаваемой как

$$F_S(\kappa) = 2\pi\kappa^2 \int_0^L dl \Phi_n(\kappa) =$$

$$= 2\pi\kappa^2 0,033 (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6} e^{-\kappa^2/\kappa_m^2} \int_0^L dl C_n^2(l)$$

(L – толщина турбулентного слоя), вводится параметр (радиус Фрида), характеризующий интенсивность турбулентности:

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

При моделировании турбулентность была представлена одним случайным фазовым экраном, расположенным на трассе распространения излучения (положение экрана на трассе варьировалось), а также набором из нескольких экранов. Задание искажений одним экраном не соответствует реальным условиям,

но позволяет рассматривать различные ситуации, помогающие понять особенности зарождения дислокаций и особенности фазового управления.

Для характеристики остаточных искажений и эффективности компенсации нами использовался критерий фокусировки

$$J(t) = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x, y) I(x, y, z_0, t) dx dy, \quad (4)$$

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

Управление пучком было реализовано на основе алгоритма фазового сопряжения [1], согласно которому фаза пучка в плоскости передачи задавалась как

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

где $\psi(x, y)$ – фаза опорного излучения.

2. Алгоритмы регистрации особых точек. Зарождение и статистика дислокаций

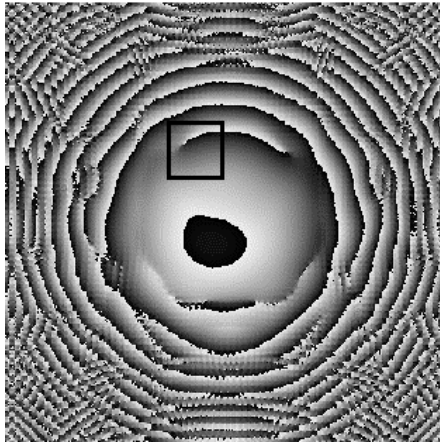
Характерной особенностью, возникающей при распространении лазерного излучения в турбулентной атмосфере, является возникновение в его фазе особых точек [11], которые одними авторами называются дислокациями [12], другими – оптическими вихрями [13]. Под оптическим вихрем понимают следующее: на фазовой поверхности существует контур, интеграл по которому равен 2π .

В настоящем разделе предложены модификации известных алгоритмов регистрации особых точек, сделаны оценки точности их работы, определена статистика дислокаций на различных расстояниях от тонкого искажающего экрана и в слое турбулентной среды, отмечен ряд характерных особенностей, проявляющихся при возникновении дислокаций. Выводы, сделанные в разделе, использованы при реализации адаптивного управления пучком.

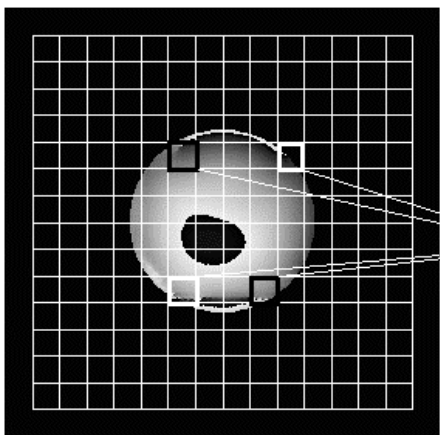
Для создания алгоритмов и оценки точности их работы была построена модель искусственного оптического вихря. Модель представляет собой поверхность, имеющую разрыв в 2π , начинающийся на краю и заканчивающийся в центре. Если эту поверхность присвоить в качестве фазы гауссовскому пучку, то его интерференционная картина будет иметь ветвящиеся полосы, т.е. одним из методов регистрации особенности является определение точек ветвления. Второй известный метод [14] – это регистрация точек локального минимума амплитуды пучка и вычисление фазового набега по контуру, проведенному вокруг точки минимума. Для точки дислокации набег должен быть равен 2π . По-видимому, использование этого алгоритма не всегда будет давать точные результаты. Для того чтобы фазовые искажения привели к изменению амплитудного профиля, необходимо пучку

пройти конечное расстояние, точное значение которого зависит от фазы. Поэтому если между плоскостью, в которой в фазу был внесен оптический вихрь, и плоскостью регистрации расстояние недостаточно большое, то изменение амплитуды пучка может не проявиться.

Для локализации дислокаций мы использовали два алгоритма. С помощью *первого алгоритма* анализируется фазовая поверхность пучка, амплитудное распределение не включено в анализ. Вся поверхность разбивается на квадраты, размеры которых могут изменяться. По периметру квадратов определяется фазовый набег. Если набег равен приблизительно 2π , то в квадрате находится особая точка. Проверка поверхности на наличие сингулярности выполняется только в заданной области, за пределами которой дислокации не определяются. Технически это реализовано очень просто – за границами области фаза задана равной нулю. Применение алгоритма для фазового профиля, приведенного на рис. 1,а, иллюстрируется на рис. 1,б, где показаны области с фазой, равной нулю (темная поверхность).



а



б

Рис. 1. Фазовый профиль пучка, имеющий особые точки (а), и иллюстрация работы алгоритма определения дислокаций, основанного на анализе фазовой поверхности (б)

Вся поверхность разбита на квадраты. Здесь же выделены четыре квадрата, в которых находятся особые точки.

Одна из задач, вызывающих интерес, решение которой возможно с использованием представленной модели, – это изучение процесса зарождения дислокаций и определение статистики особых точек на трассе распространения. Здесь проводится достаточно краткое исследование, так как основная цель работы – это компенсация турбулентных искажений, а не полное решение так называемой «фазовой проблемы». Статистика дислокаций в пучке, прошедшем тонкий турбулентный слой, а затем распространяющемся в вакууме, приведена на рис. 2. Регистрация выполнялась в области с радиусом, равным энергетическому радиусу пучка σ :

$$\sigma(t) = \left[\frac{1}{P_0 a_0^2} \iint (\mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}_c)^2 I(x, y, z_0, t) dx dy \right]^{1/2},$$

где $\mathbf{r}_\perp = \{x, y\}$ – вектор координат точки на плоскости; \mathbf{r}_c – вектор координат энергетического центра тяжести пучка.

Из рис. 2 видно, что на малом расстоянии z за экраном дислокаций практически нет ($z \leq 0,05$, $r_0 = 0,1$) или их количество мало (при $r_0 = 0,05$ и $0,03$).

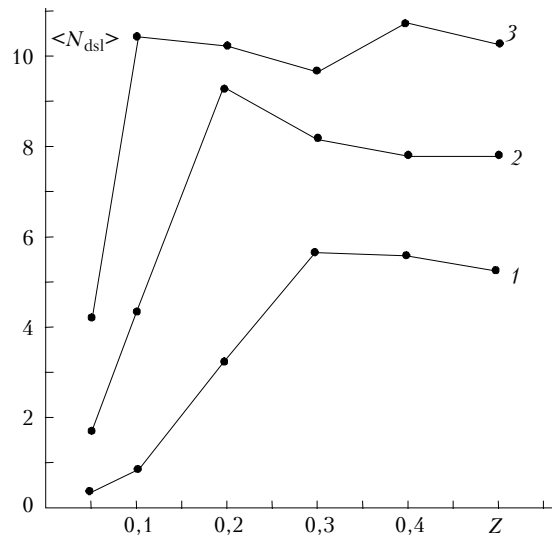


Рис. 2. Статистика дислокаций на трассе распространения пучка. Данные получены при усреднении по 50 реализациям. Турбулентность моделируется одним экраном, расположенным в начале трассы. Особые точки локализованы на основе алгоритма анализа фазовой поверхности. Кривая 1 – $r_0 = 0,1$; 2 – $r_0 = 0,05$; 3 – $r_0 = 0,03$

В дальнейшем фазовые искажения преобразуются в амплитудные, но фаза пучка тоже изменяется – число особых точек резко увеличивается (интервал $z = 0,05$; $0,3$). Затем их количество изменяется незначительно, при $z > 0,3$ наблюдается насыщение N_{dsl} .

Процесс зарождения дислокаций более детально иллюстрируется на рис. 3, где представлен фазовый профиль пучка на различных расстояниях от искажающего экрана (экран помещен непосредственно перед апертурой источника, $Z_S = 0$). Если дистанция z , которую проходит пучок после внесения искажений,

мала, его фаза в центральной части является гладкой, особенности отсутствуют. Изрезанность поверхности в центральных областях и на периферии объясняется особенностями вычисления.

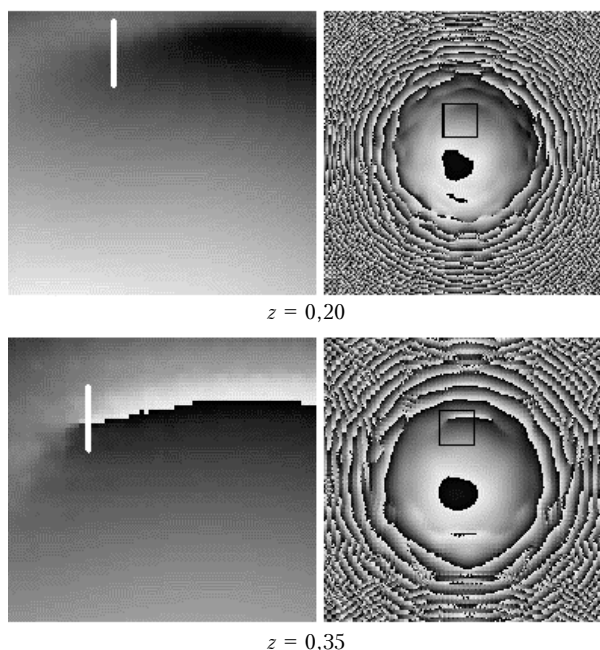


Рис. 3. Зарождение дислокаций на трассе распространения пучка. Белая линия слева – часть контура, по которому выполняется суммирование фазового набега

Профиль $\varphi(x,y)$ в задаче находится как

$$\varphi(x,y) = \text{Arg} [\text{Im}(E)/\text{Re}(E)], \quad (6)$$

где $\text{Im}(E)$ – мнимая, $\text{Re}(E)$ – действительная части комплексной амплитуды поля E . Функция $\text{Arg}(\)$ определена в диапазоне $0 - 2\pi$, если $\varphi(x,y)$ выходит за границы этого интервала, результатом вычисления является разрыв поверхности. Дополнительные искажения вносят шумы, характерные для рассматриваемых условий.

На расстоянии $z=0,2$ в фазовой поверхности возникает складка, которая затем преобразуется в оптический вихрь. В увеличенном масштабе окрестность зарождающейся дислокации помещена в левой части рис. 3, здесь же показан участок контура (белая линия), по которому выполняется «обход» фазовой поверхности. Соответствующие значения фазы представлены на рис. 4,а, из которого видно, что это действительно не дислокация – разрыва нет. С увеличением дистанции, пройденной пучком ($z=0,35$), в рассматриваемой области появляется разрыв. Это видно на рис. 3 (особенно хорошо заметна дислокация при увеличении масштаба) и на рис. 4, где помещены значения фазы для выделенного участка контура. Для двух соседних точек разрыв составляет почти 2π .

Таким образом, для развития дислокаций в турбулентной среде необходимо, чтобы пучок прошел некоторую конечную дистанцию после искажающего слоя. По-видимому, все особые точки возникают практически одновременно, этим можно объяснить резкое

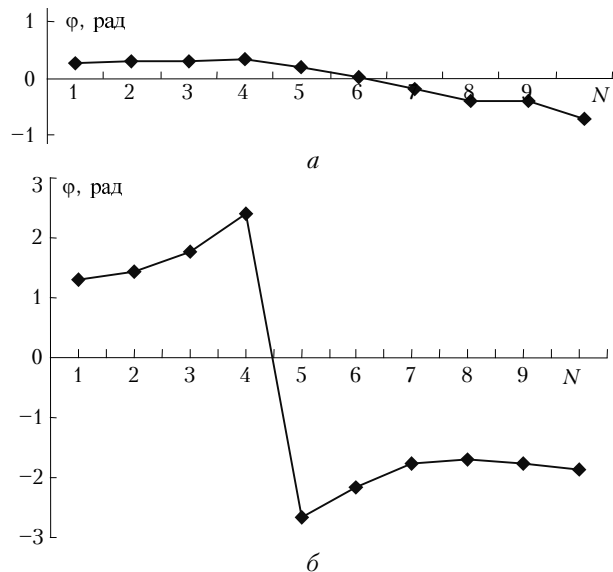


Рис. 4. Изменение фазы на выделенном фрагменте контура при $z=0,20$ (а) и $0,35$ (б); N – номер точки контура

увеличение их числа в малом интервале расстояний. Затем число N_{dsl} остается почти неизменным – все дислокации проявились и остаются в пределах области регистрации. Отметим также, что при увеличении интенсивности турбулентности число дислокаций увеличивается. На рис. 2 кривые, полученные при меньших r_0 , расположены выше кривых, соответствующих большему r_0 .

Еще одна характерная особенность распределения дислокаций в пучке иллюстрируется на рис. 5.

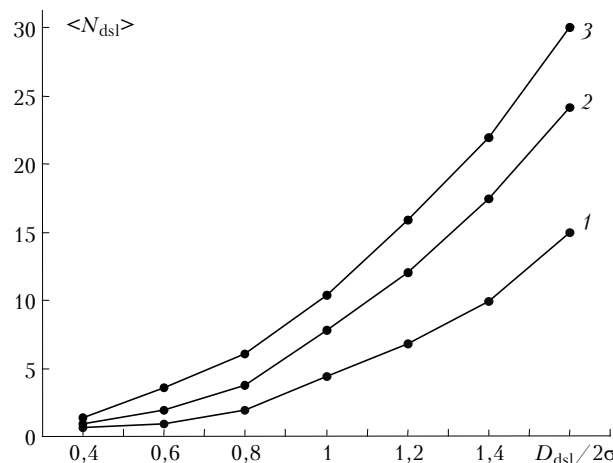


Рис. 5. Зависимость числа дислокаций $\langle N_{\text{dsl}} \rangle$ от относительного размера области, в которой дислокации определяются (D_{dsl} – диаметр области, σ – энергетический радиус пучка). Результаты усреднены по 50 реализациям. Параметры задачи: $z=0,5$, турбулентный экран расположен в начале трассы. Кривая 1 – $r_0=0,1$; 2 – $r_0=0,05$; 3 – $r_0=0,03$

Здесь приведено усредненное число особых точек в различных областях пучка, т.е. зависимость числа N_{dsl} от относительных размеров (от диаметра D_{dsl}) области, где определяются дислокации. Пучок проходит тонкий турбулентный слой, расположенный в самом начале трассы, регистрация выполняется в плоскости,

находящейся на расстоянии $z = 0,5$ от апертуры источника. Видно, что независимо от интенсивности турбулентных искажений в центральной части пучка дислокации практически отсутствуют (при относительных размерах области в $0,4$ от энергетического диаметра пучка и меньше $N_{\text{dsl}} \approx 0$). С увеличением диаметра N_{dsl} растет почти по квадратичному закону. Здесь нужно отметить, что на краях пучка шумы (или ошибки сеточного представления функций) значительно возрастают, а точность определения дислокаций резко уменьшается. Поэтому невозможно достоверно установить, чем обусловлено увеличение числа N_{dsl} – ошибками или другими факторами.

В целом можно заключить, что описанный выше алгоритм позволяет с удовлетворительной точностью определить особые точки в фазовом профиле гауссовского пучка, но имеет один существенный недостаток – он не может быть реализован экспериментально.

Поэтому *второй алгоритм*, используемый в настоящей работе, – это алгоритм, основанный на анализе интерференционной картины. В нем дислокации находятся как точки ветвления интерференционных полос. Для повышения точности метода была предложена следующая его модификация. Вся фазовая поверхность разбивалась на квадраты. Фаза, в границах каждого из квадратов, присваивалась гауссовскому пучку, для которого регистрировалась интерференционная картина. Эта картина подвергалась операции скелетонизации – по определенному уровню

интенсивность полос задавалась равной единице, ниже этого уровня интенсивность была равна нулю (схема дана на рис. 6).

В полученном скелете интерферограммы находились точки ветвления. При обнаружении таких точек полагалось, что в соответствующем квадрате имеется дислокация, при отсутствии ветвления дислокаций в квадрате нет. Алгоритм позволяет определить наличие особых точек в субапертурах датчика Гартмана – интерференция анализируется для каждого из пучков, прошедших субапертуру.

Число дислокаций на трассе распространения пучка, прошедшего тонкий турбулентный слой, определенное согласно предложенному алгоритму, приблизительно совпадает с результатами, полученными при использовании первого алгоритма.

Все приведенные выше данные получены при моделировании искажений одним фазовым экраном, т.е. при условии, когда пучок проходит тонкий турбулентный участок. Практический интерес представляет изучение распространения излучения в турбулентной атмосфере, когда искажающий объем имеет конечную не равную нулю протяженность. Особенности возникновения дислокации в таких условиях иллюстрируются данными, приведенными на рис. 7 (подобен рис. 2), где приводится количество особых точек в различных плоскостях трассы распространения. Отличие в том, что теперь плоскости регистрации расположены непосредственно в пределах искажающего слоя.

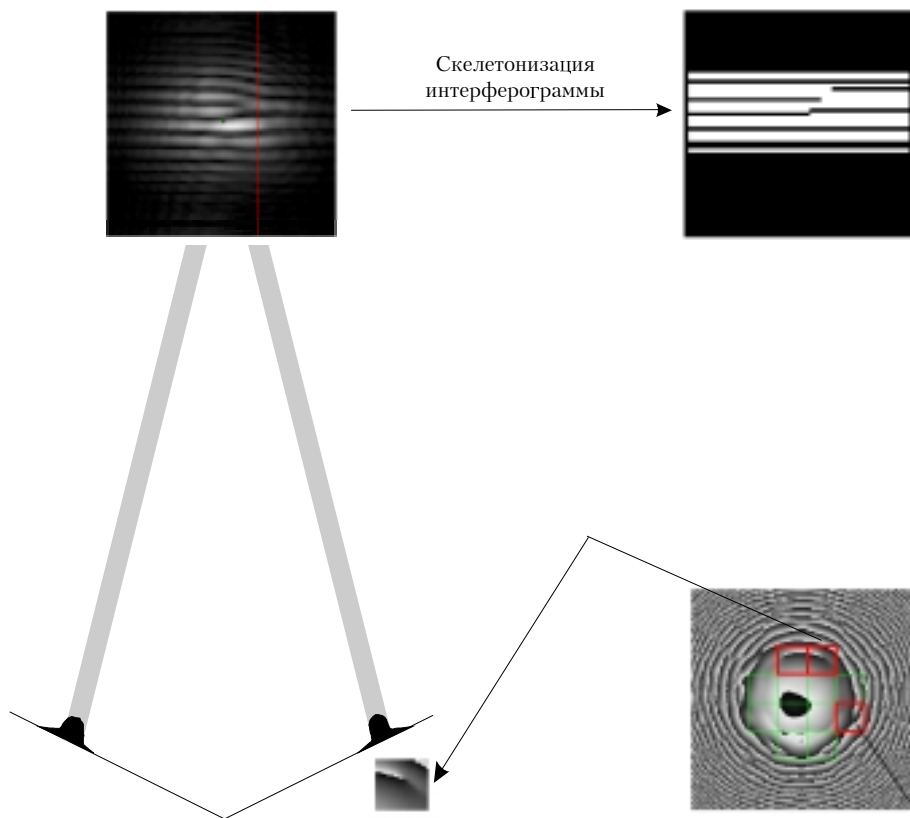


Рис. 6. Алгоритм локализации дислокаций, основанный на анализе интерференционной картины

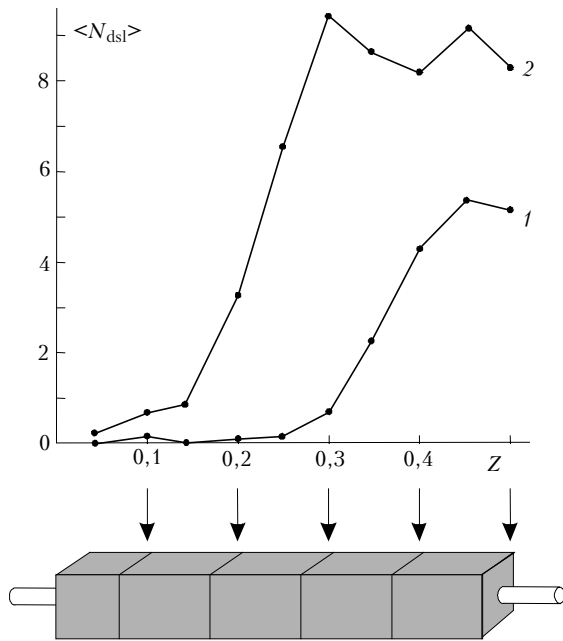


Рис. 7. Статистика дислокаций в различных плоскостях турбулентного слоя. Усреднение данных выполнено по 50 реализациям: кривая 1 – $r_0 = 0,02$; 2 – $r_0 = 0,01$

Но характерные черты развития особенностей остались прежними – дислокации отсутствуют в начале трассы (на малом расстоянии от первых фазовых экранов), затем возникают практически одновременно (резкий рост кривых). Здесь трудно говорить о насыщении количества особых точек – новые искажающие слои должны вносить дополнительные оптические вихри, поэтому поведение графиков на участках после резкого роста является достаточно сложным.

Распределение числа дислокаций в сечении пучка такое же, как в задаче с одним экраном, – в центральной области фазовая поверхность гладкая, особых точек нет.

3. Модель датчика Гартмана

В реальных системах адаптивной оптики для регистрации фазы пучков используется датчик Гартмана [3], который состоит из набора линз (линзлета), вставленных в оправу, или прозрачной пластины, сформированной из нескольких линз. Линзлет фокусирует падающее на прибор излучение. В плоскости регистрации датчика обычно устанавливаются видеокамера высокого разрешения или матрица светочувствительных элементов, разделенная на площадки, каждая из которых соответствует одной из субапертур (линзе). В пределах площадки регистрируется смещение энергетического центра тяжести пучка, по этому смещению вычисляется локальный (в пределах субапертуры) наклон волнового фронта. На основе метода наименьших квадратов по локальным наклонам восстанавливается фазовая поверхность излучения, поступившего на датчик.

Модель датчика была построена по упрощенной схеме (рис. 8). На вход программы подавался волно-

вой фронт пучка, прошедшего слой турбулентной атмосферы, результат работы – это восстановленная из локальных наклонов поверхность.

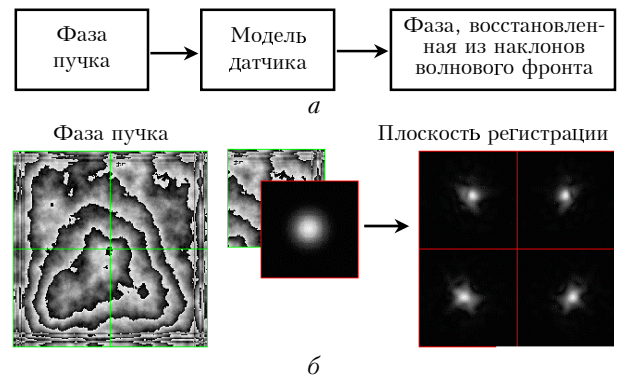


Рис. 8. Упрощенная модель датчика Гартмана: а – функции, выполняемые моделью; б – реализация алгоритма

В разработанном алгоритме волновой фронт разделялся на квадраты, часть фазовой поверхности, попадающая в отдельный квадрат, присваивалась гауссовскому пучку, затем решалась задача распространения излучения в вакууме. В плоскости регистрации определялось смещение центра тяжести, по которому вычислялся локальный наклон. Операция выполнялась для каждой из субапертур. Полная поверхность восстанавливалась по методу наименьших квадратов. Данная схема не соответствует точно описанному выше реальному датчику, тем не менее ее применение представляется целесообразным, так как в отличие от полной модели программа легко настраивается и проста для использования, а полученные результаты могут быть интерпретированы без затруднений.

Программа предоставляет возможность:

1. Изменять число субапертур в пределах от 4 (2×2) до 256 (16×16), расстояние от линзлета до плоскости наблюдения, фокусное расстояние линзлета (у всех линз фокусное расстояние одинаково).
2. Изменять отношение *радиус пучка/радиус субапертуры* (варьирование заполнения субапертуры пучком).
3. Визуально представлять работу алгоритма, выводить на экран фазовые поверхности и распределение амплитуды.
4. Задавать фазовую поверхность низшими полиномами Цернике и определять ошибки восстановления полиномов.
5. Использовать программу в качестве компонента распределенного приложения. В этом случае фазовая поверхность передается из программы, моделирующей распространение излучения, затем возвращается восстановленная поверхность.

4. Адаптивное управление при наличии дислокаций

При адаптивном управлении пучком основная характеристика точности работы датчика – это эффективность коррекции искажений. Качество компенсации

будем характеризовать критерием J , предложенным в разделе 1, который пропорционален мощности излучения, попадающей в пределы апертуры заданных размеров. В выполненных численных экспериментах использовалась упрощенная модель датчика, турбулентность задавалась одним экраном (тонкий турбулентный слой), расположенным непосредственно перед апертурой источника или на конечном расстоянии от апертуры. В первом случае параметры пучка регистрировались непосредственно за экраном и, как было показано выше, дислокации в таких измерениях отсутствуют. С увеличением интенсивности турбулентности фазовая поверхность, регистрируемая датчиком, становится более сложной, но особые точки не проявляются. Результаты управления, полученные при различном заполнении субапертуры, представлены на рис. 9. Если отношение диаметра субапертуры к диаметру пучка $D_{\text{sub}}/D_b \gg 1$, то апертура датчика абсолютно прозрачна, при уменьшении этого отношения уменьшается диаметр прозрачной области.

Для сравнения работы идеального устройства регистрации фазы (кривая 1 на рис. 9 получена с использованием идеального датчика, который обеспечивает максимальные значения критерия) и модели датчика с 64 (8×8) субапертурами, на рис. 9 представлены значения J , полученные в результате управления при использовании этих приборов. Здесь же приведены данные для прямого распространения пучка (кривая 4, контур обратной связи выключен, коррекции нет).

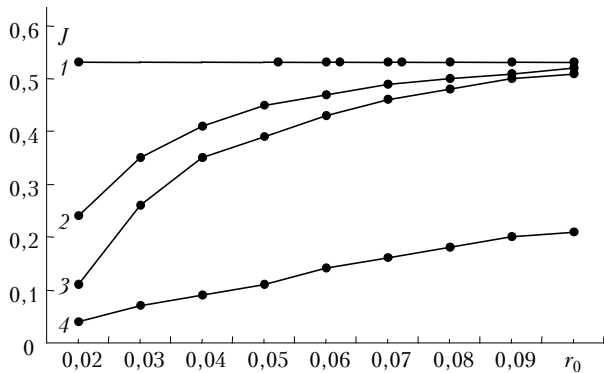


Рис. 9. Зависимость эффективности адаптивной коррекции от интенсивности турбулентных искажений при различном заполнении субапертур пучком (число субапертур 8×8 , экран расположен на нулевом расстоянии от передающей апертуры): кривая 1 – идеальный датчик; 2, 3 – радиус апертуры/радиус пучка равен соответственно 2,0 и 7,5; 4 – без управления

Из рис. 9 видно, что для любых значений радиуса Фрида идеальный датчик обеспечивает полную компенсацию турбулентности. Эффективность системы, включающей реальный датчик, уменьшается с увеличением интенсивности искажений (с уменьшением r_0). Происходит это потому, что точность регистрации сложной поверхности ниже, чем простой (кривая 2). При уменьшении диаметра прозрачной области субапертуры точность с уменьшением r_0 падает еще быстрее (кривая 3).

В разделе 1 настоящей статьи было подчеркнуто, что моделирование турбулентности одним экраном позволяет провести более детальный анализ рассматриваемой задачи по сравнению с экспериментом, в котором атмосфера представлена распределенной случайно-неоднородной линзой. В частности, возможно выделить два случая: работа датчика при отсутствии дислокаций в опорном пучке (описано выше, турбулентность – экран, расположенный в начале трассы) и регистрация фазы при наличии дислокаций. Возникают особые точки только тогда, когда пучок проходит конечное расстояние после искажающего экрана. Это условие выполняется, если экран поставить в середину трассы или на другое расстояние Z_S , не равное нулю (Z_S отсчитывается от апертуры источника). Для такого сценария эксперимента фаза опорного пучка принципиально отличается от фазы, полученной на нулевом расстоянии от экрана, – в ней появляются дислокации.

Управление в данных условиях имеет следующие особенности. Во-первых, полная компенсация искажений невозможна даже с использованием идеального датчика. Это приводит к тому, что значения критерия J уменьшаются с уменьшением r_0 даже в идеальной системе (кривая 1 на рис. 10).

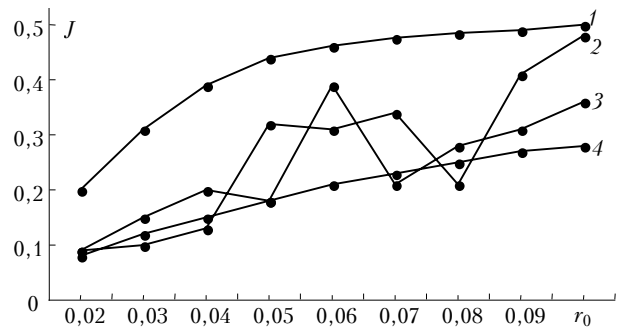


Рис. 10. Данные аналогичны представленным на рис. 9. Искажающий экран помещен на расстоянии 0,25 от апертуры источника (в середине трассы)

Объясняется снижение эффективности нарушением принципа оптической обратимости при коррекции. Для выполнения условия полной компенсации необходимо сформировать на входе в среду пучок с мнимой частью комплексной амплитуды поля, обратной по знаку мнимой части опорного пучка:

$$\text{Im}(E_{\text{beam}}) = -\text{Im}(E_{\text{beacon}}), \quad (7)$$

где $\text{Im}(E_{\text{beam}})$ – мнимая часть амплитуды прямого пучка, $\text{Im}(E_{\text{beacon}})$ – опорного. С точки зрения физики эта операция означает, что на входе в среду задается пучок с амплитудным профилем, совпадающим с профилем опорного сигнала, и с фазой, обратной фазе опорного, т.е. выполняется обращение волнового фронта (ОВФ). С использованием ОВФ достигается полная компенсация турбулентного слоя, расположенного на любом расстоянии от лазерного источника. Если же амплитуда задается с отклонением от требуемой, то эффективность коррекции уменьшается, что и наблюдается в данных, представленных на

рис. 10. Дальнейшее уменьшение эффективности наблюдается при включении в систему датчика Гартмана. Фазовое сопряжение в такой системе неустойчиво (кривые 2 и 3 на рис. 10), что объясняется двумя типами ошибок, которые допускаются при коррекции: нарушение принципа оптической обратимости (замена ОВФ фазовым сопряжением) и наличие дислокаций в опорном пучке.

Все приведенные выше результаты были получены для одной из реализаций случайного фазового экрана – для статистической задачи, какой является задача адаптивного управления пучком в турбулентной атмосфере. Сделанные выводы должны быть подтверждены данными, полученными в результате усреднения. Для сценария, когда экран находился в середине трассы, были выполнены необходимые вычисления, и их результаты приводятся на рис. 11.

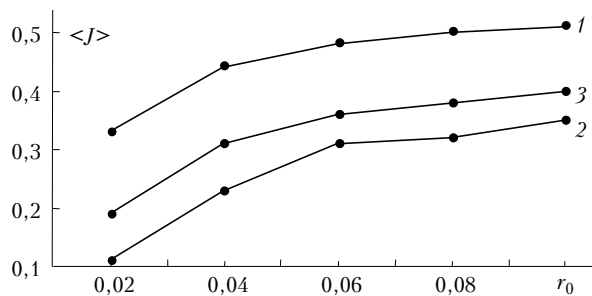


Рис. 11. Иллюстрация эффективности адаптивной коррекции с использованием датчика Гартмана. Выполнено усреднение по 50 реализациям. Экран в середине трассы. Кривая 1 – в систему включен идеальный датчик; 2 – датчик Гартмана с числом субапертур 8×8 ; 3 – управление отсутствует

Как и в предыдущих опытах, с ростом интенсивности турбулентности компенсация экрана, находящегося на конечном расстоянии от апертуры источника, становится неэффективной из-за дислокаций, полученные значения критерия фокусировки даже ниже, чем при выключенном контуре обратной связи. При отсутствии дислокаций датчик работает с удовлетворительной точностью, которая уменьшается с уменьшением r_0 , т.е. основные закономерности управления такие же, как в случае компенсации одной из реализаций экрана.

Все представленные выше результаты были получены для датчика диаметром в 7 раз больше диаметра пучка, оптимизация размеров не проводилась. В то же время из данных рис. 5 следует, что дислокации сосредоточены в периферийной области, т.е. при уменьшении размеров датчика возможно уменьшить количество особых точек в субапертурах или совсем исключить их. Поэтому были проведены численные эксперименты по оптимизации диаметра приемного устройства. Результаты управления с датчиком, диаметр которого составил 1,5 энергетического диаметра пучка, приводятся на рис. 12 (экран находился в середине трассы, в опорном пучке присутствовали дислокации). Из рис. 12 видно, что на отдельных реализациях значения критерия фокусиров-

ки монотонно убывают с ростом интенсивности искажений, это означает, что получена стабилизация управления (кривая 2). Усредненные значения критерия (кривая 1) выше по сравнению с экспериментом, в котором петля обратной связи была отключена (данные для случая, когда коррекция отсутствует, приведены на рис. 10 для отдельной реализации и на рис. 11 – усредненные значения критерия).

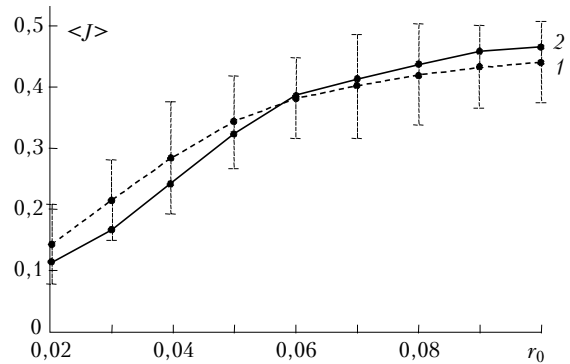


Рис. 12. Результат управления при включении в систему датчика Гартмана с оптимальными размерами (экран в середине трассы): кривая 1 – усреднение по 50 реализациям; кривая 2 – отдельная реализация

Таким образом, косвенно подтверждается вывод о том, что именно дислокации приводят к срыву управления, и иллюстрируется возможность уменьшить влияние особых точек на компенсацию турбулентных искажений.

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
2. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Алгоритмы компенсации теплового воздействия // Оптика атмосф. 1991. Т. 4. № 12. С. 1237–1247.
3. Luis Diaz Santana Haro. Wavefront Sensing in the Human Eye with a Shack–Hartmann Sensor. London: Publishing House of London University. 2000. 97 p.
4. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 211 с.
5. Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Коняев П.А., Фортес Б.В. Численная модель адаптивной оптической системы. Ч. 2 // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 3. С. 419–428.
6. Лукин В.П., Майер Н.Н., Фортес Б.В. Расчет функции рассеяния точки адаптивного телескопа с гартмановским датчиком волнового фронта // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 12. С. 1241–1251.
7. Voitsekhovich V., Sanchez L., Orlov V., Cuevas S. Efficiency of the Hartmann test with different subpupil forms for the measurement of turbulence-induced phase distortions // Appl. Opt. 2001. V. 40. N 9. P. 1299–1304.
8. Laude V., Olivier S., Dirson C., Huignard J.-P. Hartmann wave-front scanner // Opt. Lett. 1999. V. 24. N 24. P. 1796–1798.
9. Barbier P.R., Bush D.W., Polak-Dingles P., and Plett M.L. Improvement of a laser communication beam using adaptive optics // Proc. of the 2-nd International Workshop on Adaptive Optics in Industry and Medicine. Durham, UK. 1999. P. 352–357.

10. *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.
11. *Primmerman A., Pries R., Humphreys R.A., Zollars B.G., Barclay H.T., and Herrmann J.* Atmospheric compensation experiments in strong-scintillation conditions // Appl. Opt. 1995. V. 34. N 12. P. 2081–2088.
12. *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. Amtr. 1985. V. 73. № 5. P. 525–528.
13. *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.
14. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Лавринова Л.Н.* Исследование коррекции турбулентных искажений на основе фазового сопряжения при наличии дислокаций в фазе опорного пучка // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1170–1175.

F.Yu. Kanev, V.P. Lukin, and N.A. Makenova. **Registration of phase profile of coherent radiation and realization of adaptive control over laser beam in the presense of singular points in wave front.**

The paper considers compensation for turbulent distortions of laser beams by an adaptive system including a Hartman sensor. Control is realized under the conditions of singular points present in the phase profile of radiation. To analyze the effect of dislocations on the accuracy of wave front registration, two algorithms for localization of singular points have been developed. The first algorithm is based on analysis of the phase surface of radiation and can be used only in numerical experiment. In the second algorithm, dislocations are determined as branching points of interference bands. This algorithm can be implemented experimentally. The accuracy provided by the both algorithms has been compared. The statistics of dislocations on the path has been obtained with the use of these algorithms. The efficiency of phase conjugation has been analyzed taking into account the restructions introduced by the sensor. It has been shown that control loses stability in the presence of dislocations. A method has been proposed to increase the stability.