

Ф.Ю. Канев

Регистрация сингулярного волнового фронта с использованием датчика Гартмана. Эффективность адаптивной системы, включающей датчик

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 27.10.2004 г.

Рассматривается влияние двух ключевых элементов адаптивной системы — датчика Шэка–Гартмана и упругого зеркала на эффективность коррекции атмосферной турбулентности. В частности, выполнен анализ восстановления волнового фронта датчиком в условиях, когда фаза опорного излучения не имеет особенностей и при наличии дислокаций. Показано, что появление оптических вихрей не всегда приводит к потере точности регистрации фазы и устойчивости адаптивного управления в системе, включающей реальный датчик и идеальное зеркало. С другой стороны, использование реального зеркала с непрерывной отражающей поверхностью в подобных условиях приводит к потере стабильности управления пучком.

Методы измерения волнового фронта и приборы, предназначенные для таких измерений, хорошо известны, поэтому, не рассматривая подробно их оптические схемы и алгоритмы работы, остановимся лишь на ряде статей, авторы которых отмечают особенности, возникающие при использовании датчика Гартмана для регистрации фазовой поверхности, имеющей разрывы.

Одна из первых работ, в которой рассматривалось появление оптических вихрей и предлагались методы восстановления фазы, была опубликована Д. Фридом с соавторами в 1992 г. [1]. Ими не только указывалось на существование проблемы, но и были рассмотрены методы ее решения. Впоследствии Д. Барчерс [2] показал, что именно появление дислокаций приводит к снижению эффективности регистрации фазы датчиком Гартмана. Этот результат был представлен и в статьях, опубликованных практически в это же время [3–5].

В публикациях последних лет сообщалось о повышении точности методов регистрации волнового вихревого пучка, проводилось их сравнение [6–8]. В настоящее время имеется достаточно полная информация, позволяющая выполнить операцию восстановления фазы [9, 10].

Особенностью приведенных здесь статей является то, что описанные в них методы использовались для восстановления фазы, определяемой как арктангенс отношения мнимой и действительной частей комплексной амплитуды светового поля, т.е. фаза до и после восстановления определялась в узлах расчетной сетки с разрешением значительно больше, чем у реального датчика.

В настоящей статье алгоритм восстановления сингулярной фазы входит непосредственно в модель датчика, соответствующую реальному прибору. Кроме того, оценивается влияние упругого зеркала

с непрерывной отражающей поверхностью на адаптивное управление пучком.

1. Регистрация датчиком Гартмана заданной фазовой поверхности и эффективность работы прибора в системе фазового сопряжения

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, были выполнены на основе методов численного эксперимента. В моделируемой оптической схеме лазерный пучок проходит через тонкий слой турбулентной среды, моделируемый одним фазовым экраном, или через распределенную турбулентную линзу, заполняющую всю трассу от апертуры до плоскости наблюдения. В случае одного экрана его положение на трассе варьируется, т.е. изменяется расстояние Z_s от экрана до лазера. Интенсивность атмосферной турбулентности характеризуется радиусом Фрида

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

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

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

имеющий смысл относительной доли световой мощности, попадающей в пределы апертуры радиуса a_0 . Здесь P_0 — полная мощность пучка;

$$\rho(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/a_0^2)$$

– апертурная функция.

При получении результатов, приведенных в данной статье, в общую модель системы поочередно включались две модели датчика Гартмана, описание которых помещено в работах [3, 4]. Первая модель является упрощенной, она легко настраивается и обладает более высокой точностью. В то же время модель достаточно далека от реального прибора.

Вторая модель в большей степени соответствует реальному датчику, но при работе с ней возникают большие трудности. В частности, точность определения фазы значительно снижается при несовпадении плоскости регистрации и плоскости, в которую линзлет фокусирует пучки, в большей степени проявляются ограничения динамического диапазона, модель обладает несколько меньшей точностью. Поэтому при получении результатов использовалась следующая методика. Все данные были рассчитаны с использованием упрощенной и более надежной в работе модели. Затем основные зависимости тестировались с привлечением второй модели датчика.

На начальных этапах в обоих датчиках использовались одинаковые алгоритмы сшивки фазовой поверхности. Схематично сшивка полной фазовой поверхности из наклонов, регистрируемых в субапертурах, показана на рис. 1.

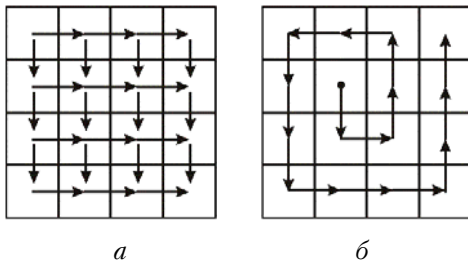


Рис. 1. Схематическое изображение алгоритмов восстановления фазовой поверхности. «Сшивка» полос (а) и «сшивка» по спирали (б)

В первом варианте из субапертур на основе метода наименьших квадратов формировались полосы, затем выполнялось совмещение полос (рис. 1,а). Во втором варианте сшивка элементов датчика выполнялась «по спирали», так как это показано на рис. 1,б.

Известно, что для компенсации атмосферной турбулентности и теплового самовоздействия, т.е. в тех случаях, когда предполагается использование системы, включающей датчик, достаточно задание фазы низшими полиномами Цернике [11, 12]. Поэтому целесообразным является исследование точности регистрации датчиком этих полиномов. Результаты численных экспериментов, в которых была получена зависимость отклонения полученной фазовой поверхности от заданной при различном числе субапертур, представлены на рис. 2.

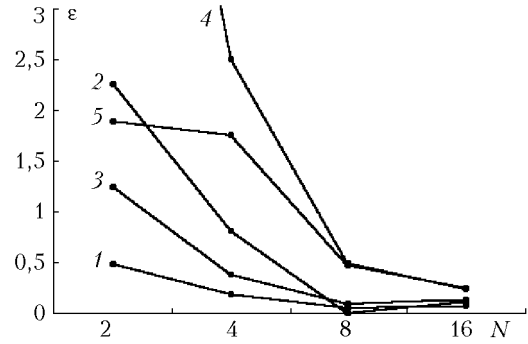


Рис. 2. Зависимость точности регистрации фазовой поверхности, заданной низшими полиномами Цернике, от числа субапертур датчика: ϵ – квадратичная ошибка; N – число субапертур датчика по одной из координатных осей (полная размерность линзлета $N \times N$). Кривые: 1 – наклон; 2 – фокусировка; 3 – астигматизм; 4 – кома, 5 – сферическая абберация

Отклонение характеризовалось квадратичной ошибкой ϵ , определяемой как

$$\epsilon = \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (\varphi_{i,j} - \psi_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varphi_{i,j}^2} \right)^{1/2},$$

где M – размерность расчетной сетки; φ – поверхность, полученная в результате регистрации; ψ – регистрируемая поверхность. Расчеты были выполнены с использованием второй модели датчика (прототип реального прибора), для сшивки применялись оба описанных выше метода, зависимость точности от алгоритма сшивки обнаружена не была.

Приводимые данные показывают, что при $N = 8$ (размерность линзлета 8×8) точность регистрации наклона, астигматизма и фокусировки является удовлетворительной, ошибка составляет менее 10%. Худшие результаты были получены для комы и сферической абберации, где ϵ приблизительно равна 0,5 (50%). При этом точность практически не повышается при увеличении размерности до значений 16×16 . Идеализированная модель датчика позволяет получить значения квадратичной ошибки на 5–7% меньше, но не вызывает радикального изменения полученных тенденций.

Если возрастание N приводит к уменьшению размеров линз, составляющих линзлет, то от числа субапертур косвенно зависит динамический диапазон датчика. Это иллюстрируется на рис. 3, на котором видно, что при $N = 16$ наклоны на краях фазовой поверхности регистрируются неправильно.

Рассмотрев регистрацию фазовой поверхности, заданной низшими полиномами, перейдем к анализу возможности использования датчика в системах коррекции атмосферных искажений. Типичный фазовый профиль, полученный после прохождения пучком турбулентного экрана на одной из реализаций, показан на рис. 4. Регистрация этого профиля датчиком иллюстрируется на рис. 5, где приводятся восстановленная поверхность, полученная при различной размерности прибора, и ее поперечное сечение.

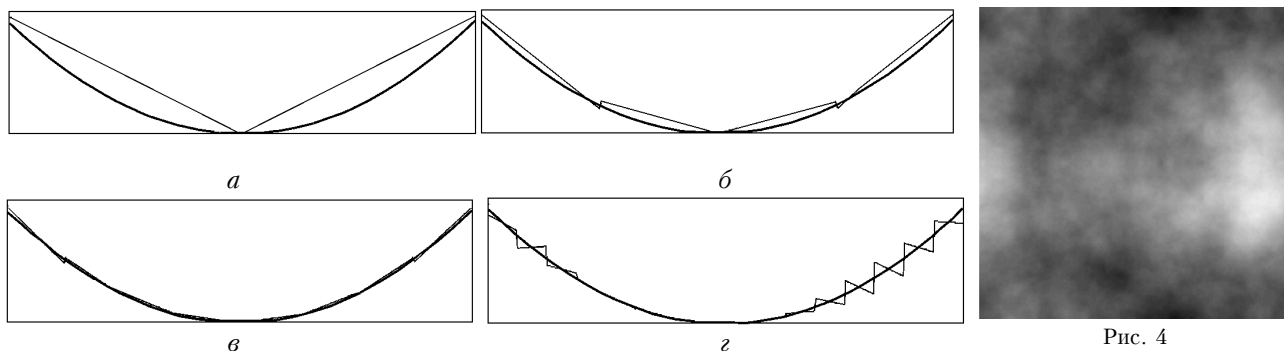


Рис. 3

Рис. 3. Иллюстрация точности регистрации фазовой поверхности на примере определения фокусировки. Жирная линия – заданная поверхность, тонкая линия – восстановленная поверхность. Число субапертур равно 2×2 (а), 4×4 (б), 8×8 (в) и 16×16 (г)

Рис. 4. Восстанавливаемая фазовая поверхность

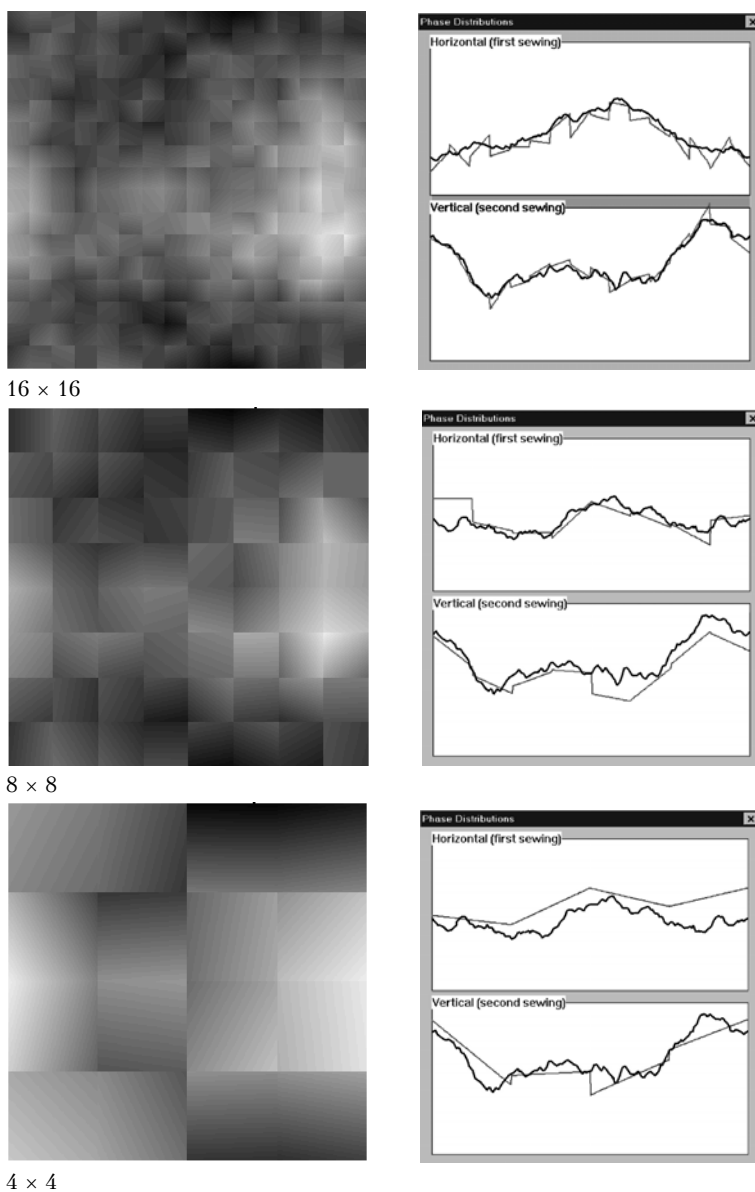


Рис. 5. Восстановление фазовой поверхности датчиком Гартмана. Слева – полученная в результате восстановления поверхность, справа – горизонтальное и вертикальное поперечные сечения восстанавливаемой поверхности (жирная линия) и поверхности, регистрируемой датчиком (тонкая). Под рисунками указано число субапертур датчика

При числе субапертур 16×16 как визуально, так и на распределении поперечного сечения видно, что датчик регистрирует поверхность достаточно точно, хотя сечение показывает ограничение диапазона и связанное с этим появление ошибок на краях. Уменьшение размерности снижает точность, наклон в пределах субапертуры является аппроксимацией реального профиля. Это хорошо заметно, если размерность составляет 4×4 субапертуры.

Погрешности восстановления фазы вызывают снижение эффективности компенсации атмосферной турбулентности. Это показано на рис. 6, где приводится зависимость критерия фокусировки J , полученного в результате фазового сопряжения в идеальной адаптивной системе (кривая 1) и системе, включающей датчик Гартмана с линзлетом 8×8 (кривая 2) от интенсивности турбулентных искажений. Искажающий фазовый экран расположен в начале трассы, это означает, что дислокации в волновом фронте опорного излучения отсутствуют.

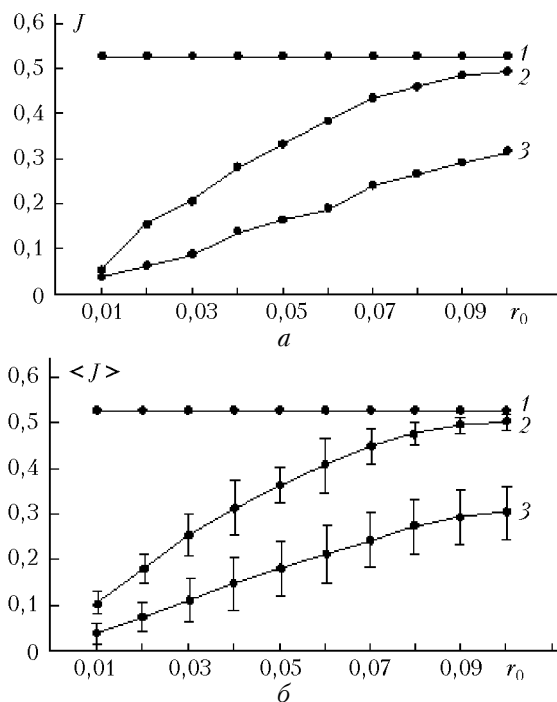


Рис. 6. Зависимость эффективности компенсации атмосферной турбулентности от интенсивности искажений для одной из реализаций случайного фазового экрана (а) и при усреднении по 50 реализациям (б). Турбулентность моделируется одним экраном, расположенным в начале трассы, протяженность трассы $z = 0,5$. J – критерий фокусировки, r_0 – радиус Фрида. Кривая 1 получена для идеальной системы, 2 – для системы, включающей датчик, 3 – без управления

С увеличением интенсивности турбулентности и возрастанием сложности восстанавливаемой фазы (уменьшением r_0) эффективность сопряжения заметно падает и при $r_0 = 0,01$ управление пучком позволяет получить увеличение концентрации светового поля в плоскости наблюдения. В то же время при умеренной и малой интенсивности искаже-

ний датчик обеспечивает значения критерия фокусировки, в два и более раз превышающие результаты, полученные при выключенном адаптивном управлении (сравнение кривых 2 и 3).

Приведенные данные позволяют заключить, что при отсутствии особых точек и достаточном числе субапертур датчик Гартмана обеспечивает удовлетворительное качество компенсации турбулентных искажений.

2. Влияние дислокаций на точность восстановления фазы датчиком Гартмана

В работах [13, 14] было показано, что дислокации возникают в фазе пучка, прошедшего конечное (больше чем нуль) расстояние после искажающего экрана. Поэтому, поместив экран в плоскость апертуры источника, мы обеспечивали полное отсутствие особых точек в опорном излучении. Если же фазовый экран расположен в середине трассы распространения излучения и длина этой трассы составляет половину дифракционной длины, то в волновом фронте опорного излучения появляются оптические вихри.

Результаты, полученные при использовании адаптивной системы фазового сопряжения, для компенсации одной из реализаций двумерного поля случайных искажений представлены на рис. 7, а, усредненные данные – на рис. 7, б.

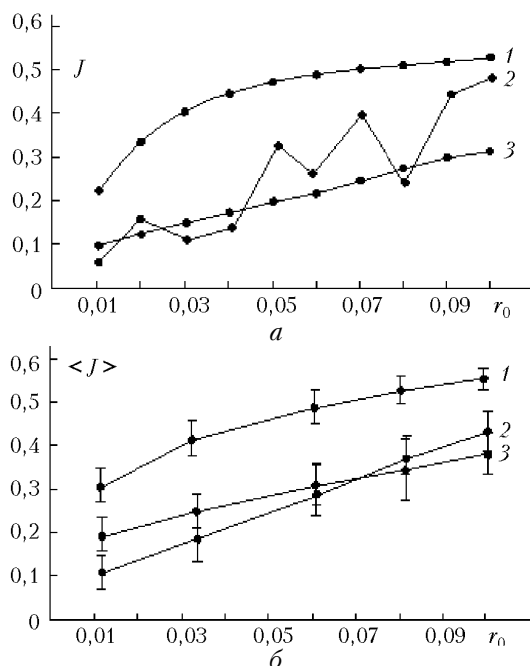


Рис. 7. Эффективность системы фазового сопряжения, включающей датчик при наличии дислокаций в фазовом профиле опорного излучения. Дистанция распространения $z = 0,5$, турбулентность моделируется одним экраном, расположенным в середине трассы. Приведены данные, полученные для одной из реализаций фазового экрана (а), и при усреднении по 50 реализациям (б). Кривая 1 – результат управления с идеальным датчиком; 2 – с датчиком, имеющим линзлет размерности 8×8 ; 3 – без управления

Кривая 1 соответствует идеальному датчику, т.е. прибору, в котором фаза вычисляется как $\arctg(\text{Im}(E)/\text{Re}(E))$, где $\text{Im}(E)$ – мнимая и $\text{Re}(E)$ – действительная части комплексной амплитуды светового поля. Точность регистрации фазового профиля в этом случае определяется только размерностью расчетной сетки и не зависит от наличия дислокаций. Тем не менее результирующие значения критерия фокусировки ниже, чем при полной компенсации искажений, когда J равнялось 0,53. Объяснить это возможно нарушением принципа оптической обратимости при фазовом сопряжении.

Результаты, полученные при использовании датчика в адаптивной системе фазового сопряжения, представлены на рис. 7 кривой 2. Можем видеть, что управление в этом случае является нестабильным, изменение интенсивности турбулентных искажений приводит к осцилляциям критерия фокусировки на отдельных реализациях (рис. 7,а, кривая 2) и снижению усредненных значений (кривая 2 на рис. 7,б). Падение средних значений критерия может быть настолько большим, что при выключенной петле обратной связи достигается более высокая концентрация светового поля в плоскости наблюдения. Попробуем дать объяснение полученным графикам.

В системе фазового сопряжения, включающей датчик при компенсации искажений, задаваемых экраном, помещенным в середине трассы распространения, присутствуют три источника ошибок:

1. Нарушение принципа оптической обратимости, приводящее к неполной компенсации аберраций.

2. Ограниченное разрешение датчика и обусловленные этим погрешности при регистрации гладкого (без разрывов) фазового профиля.

3. Ошибки, обусловленные наличием дислокаций.

Погрешности первого типа легко исключить. Для этого нужно построить оптическую схему, в которой амплитуда пучка на входе в среду задается равной амплитуде опорного сигнала, а фазовый профиль бакема регистрируется датчиком. Отметим, что данный эксперимент соответствует включению датчика в двухзеркальную адаптивную систему [15]. Результаты коррекции искажений для рассматриваемой модели приводятся на рис. 8. Здесь идеальный датчик обеспечивает абсолютную компенсацию фазового экрана (кривые 1 на рис. 8), тогда как реальный прибор вновь приводит к осцилляциям значений критерия на отдельных реализациях (кривая 2, рис. 8,а) и снижению усредненных данных (кривая 2, рис. 8,б). Таким образом, выполнение условий принципа оптической обратимости не обеспечивает радикального увеличения полученных значений критерия.

Погрешности второго типа также не могут привести к потере стабильности фазового управления. В предыдущем разделе было показано, что ограниченное разрешение датчика приводит к снижению концентрации поля, значения критерия монотонно убывают с ростом интенсивности искажений. Осцилляциям и потере стабильности управления в этом случае не наблюдалось.

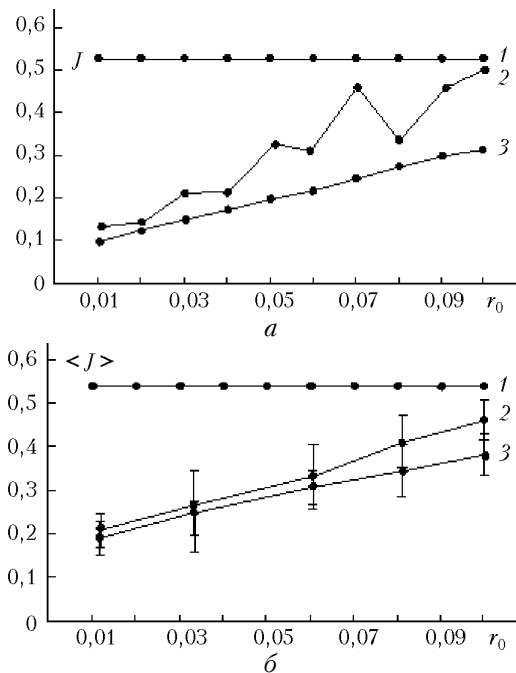


Рис. 8. Включение датчика в систему амплитудно-фазового управления. Параметры задачи см. рис. 7. Кривая 1 – результат управления с идеальным датчиком; 2 – с датчиком, имеющим линзлет размерности 8×8 ; 3 – без управления

Остается третий источник ошибок – наличие особых точек в волновом фронте. Идеальный датчик не реагирует на их присутствие, а реальный прибор вызывает падение эффективности системы.

3. Принципиальная возможность регистрации фазовой поверхности, имеющей разрывы

Для того чтобы выяснить, почему адаптивная система, включающая датчик, теряет эффективность при наличии дислокаций в волновом фронте, в качестве экрана, вносящего искажения, был использован фазовый профиль, имеющий искусственно заданную особую точку. Искажающий экран приведен на рис. 9,а, а на рис. 10,а показано амплитудное распределение гауссовского пучка, прошедшего трассу, в самом начале которой располагался данный экран.

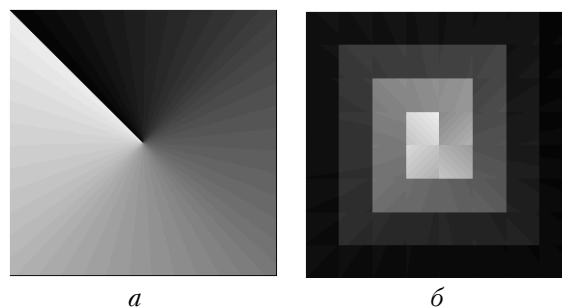


Рис. 9. Иллюстрация работы датчика при использовании алгоритма спиральной сшивки: а – регистрируемая фазовая поверхность; б – поверхность, полученная в результате восстановления

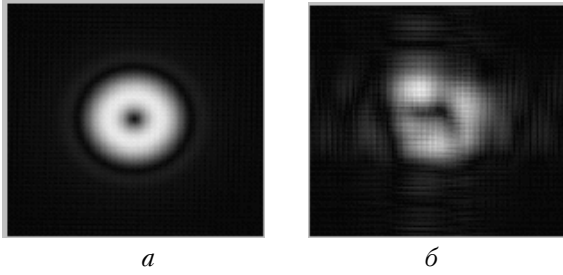


Рис. 10. Коррекция фазового экрана, включающего искусственную дислокацию. Распределение светового поля в плоскости наблюдения, полученное при проходе пучком экрана (а), результат коррекции экрана (б). Датчик работает на основе алгоритма спиральной сшивки, длина трассы $z = 0,5$

Искажения компенсировались на основе алгоритма фазового сопряжения. В систему был включен датчик, в котором сшивка субапертур выполнялась «по спирали» (направление сшивки субапертур показано на рис. 1,б). Полученная в результате восстановления волнового фронта датчиком поверхность не имела особенностей (рис. 9,б), т.е. значительно отличалась от регистрируемого профиля. Естественно, что адаптивное управление пучком не привело к компенсации искажений (рис. 10,б). Применение второго алгоритма восстановления, согласно которому сшивались полосы субапертур (см. рис. 1,б), также показало отрицательные результаты.

Несмотря на неудачу при компенсации искажений, мы полагали, что датчик Гартмана достаточно точно регистрирует локальные наклоны, а ошибки восстановления обусловлены алгоритмом сшивки, в котором совмещаются стороны сегментов, расположенные на краях разрыва фазовой поверхности. Чтобы доказать это предположение, был изменен алгоритм восстановления фазы. В модификации метода определялась точка дислокации, от нее в произвольном направлении проводилась прямая линия, соответствующая разрыву. Субапертуры, между которыми проходила линия, не сшивались между собой. Схема алгоритма показана на рис. 11,а, восстановленная поверхность приводится на рис. 11,б.

Можем видеть, что из-за произвольного выбора направления разрыв смещен, но в остальном заданная и результирующая поверхности идентичны.



Рис. 11. Алгоритм сшивки поверхности, имеющей разрыв непрерывности. Схема алгоритма (а), поверхность (б) и результат сшивки (в)

Включение в систему датчика, работающего на основе данного алгоритма, позволило добиться высокого качества компенсации искажений, задаваемых экраном, имеющим одну особую точку.

Предложенный алгоритм может быть использован и при большем, чем одна, количестве особых точек. В этом случае необходимо определить ориентацию каждого из оптических вихрей и провести разрывы между точками, имеющими противоположную ориентацию. В остальном методика не изменяется.

Результат восстановления поверхности датчиком и коррекция искажений, заданных экраном с четырьмя особыми точками, иллюстрируются на рис. 12, где представлены интерфейсы программ, моделирующих распространение пучка в искажающей среде, и датчик Гартмана (слева). Искажающий фазовый экран выводится в окне «Phase Scg», в окне «Target Ampl» приведено распределение интенсивности лазерного пучка в плоскости наблюдения, полученное в результате коррекции. Длина трассы равна 0,5, экран расположен в середине трассы.

Распределение амплитуды пучка соответствует моменту времени, когда уже выполнена адаптивная коррекция. Представление об искажениях возможно составить по распределению амплитуды опорного пучка, показанному в окне «Ampl Return». В данном случае в результате управления достигнута высокая точность компенсации aberrаций, результирующий пучок (окно «Target Ampl») является практически гауссовским. Абсолютная коррекция конечно же не наблюдается, т.е. искажающий слой находится в середине трассы и для его компенсации необходимо использование методов амплитудно-фазового управления пучком.

Результаты адаптивного управления пучком в системе, включающей датчик, работающий на основе модифицированного алгоритма сшивки фазовой поверхности, представлены на рис. 13, который аналогичен рис. 7, где также приводятся значения критерия фокусировки, полученные при коррекции турбулентного экрана, расположенного в середине трассы управления. Особенность данного сценария численного эксперимента заключается в том, что в опорном излучении имеются особые точки.

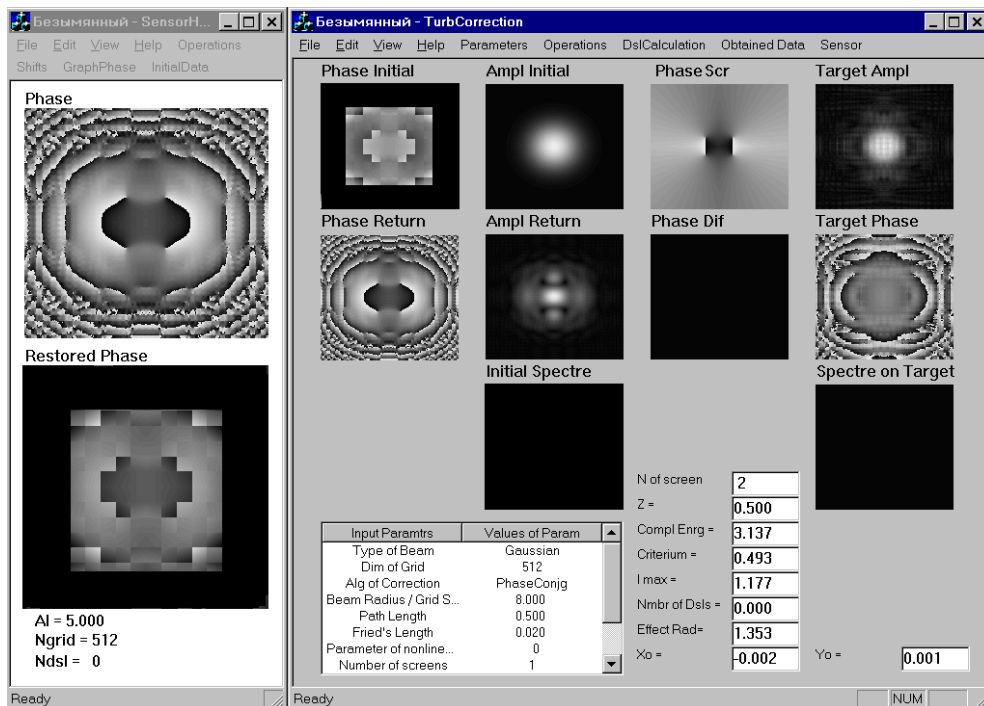


Рис. 12. Интерфейс программы, моделирующей систему с включенным в нее датчиком. Окно «Phase Return» демонстрирует фазовый профиль опорного излучения; «Phase Initial» – поверхность, восстановленная датчиком; «Phase Scr» – искажающий фазовый экран

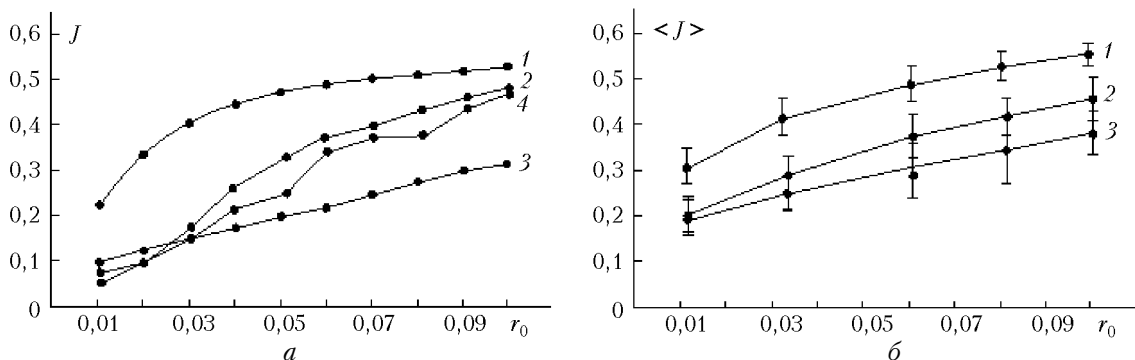


Рис. 13. Эффективность системы фазового сопряжения, включающей датчик, при наличии дислокаций в фазовом профиле опорного излучения. Дистанция распространения $z = 0,5$, турбулентность моделируется одним экраном, расположенным в середине трассы: a – данные, полученные для одной из реализаций фазового экрана, b – при усреднении по 50 реализациям. Кривая 1 – результат управления с идеальным датчиком; 2 – с датчиком, имеющим линзлет размерности 16×16 ; 4 – линзлет размерности 8×8 ; 3 – без управления

Сравнив рис. 13 и 7, отметим, что в результате модификации алгоритма на отдельной реализации уменьшились осцилляции критерия при изменении интенсивности турбулентных искажений, а также получились более высокие усредненные значения, которые теперь превышают значения, регистрируемые при отключенном контуре обратной связи (без управления).

В заключение раздела отметим, что предложенный здесь алгоритм, позволяющий восстанавливать фазовую поверхность, имеющую разрывы непрерывности, не является универсальным, возможно, что он будет приводить к ошибкам, если вводимые разрывы существенно не совпадают с реальными.

4. Полная модель системы. Эффективность адаптивного управления пучком

Введение в модель адаптивной системы упругого зеркала дало вполне ожидаемые результаты. В частности, использование корректора с малым числом приводов вызвало появление дополнительных ошибок воспроизведения фазы системой «датчик–зеркало».

Это иллюстрируется на рис. 14, где помещены значения квадратичного отклонения ϵ , полученного при регистрации фазового профиля, заданного низшими полиномами Цернике (наклон, фокусировка, астигматизм, кома, сферическая aberrация).

В численных экспериментах, результаты которых представлены на рис. 14, изменялось количество и субапертур, и сервоприводов. Видно, что при размерности линзлета 2×2 ошибка определяется главным образом датчиком, включение зеркала может привести к небольшому (3–4%) увеличению ϵ .

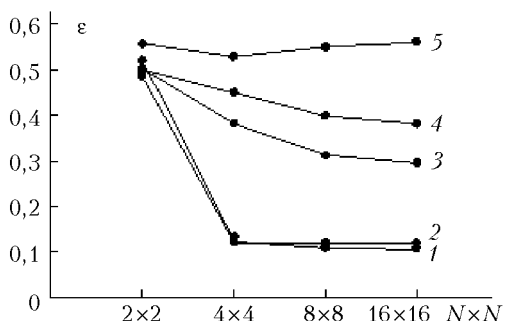


Рис. 14. Точность регистрации фазового профиля датчиком и воспроизведения зеркалом. Кривая 1 – точность регистрации (погрешности, вносимые зеркалом не учитываются); 2 – точность воспроизведения зарегистрированной фазы системой «датчик–зеркало», включающей корректор с 49 приводами; 3 – с 21; 4 – с 9; 5 – с 5 приводами

С возрастанием точности регистрации волнового фронта, достигаемой за счет увеличения числа субапертур, влияние корректора становится более выраженным.

Так, при размерности линзлета 4×4 и выше зеркало с 5 сервоприводами дает практически одинаковые значения ϵ , которые изменяются в диапазоне от 50 до 60%. Несмотря на то что ошибка самого датчика составляет в этом диапазоне не более 10%, точность полной системы очень мала и ограничивает ее именно зеркало.

Уменьшить квадратичную ошибку, вносимую корректором, можно за счет увеличения числа его степеней свободы. Это иллюстрируется на рис. 14, где также приведены значения ϵ для системы «датчик–зеркало», включающей корректор с 9 и 21 приводами (кривые 4 и 3). Дальнейшее увеличение числа степеней свободы позволяет уменьшить ошибку, вносимую зеркалом, практически до нуля (кривая 2).

Ситуация изменяется, если в пучке появляются дислокации. Рассмотрим, как работает система в этих условиях. Первый этап исследований был выполнен на основе модельной задачи, как это было сделано выше. На трассе распространения пучка помещался фазовый экран, имеющий особые точки, управление выполнялось на основе алгоритма фазового сопряжения. Выше было показано, что датчик позволяет добиться компенсации подобных искажений. Но дополнение расчетной схемы зеркалом с 49 приводами привело к потере эффективности алгоритма.

На рис. 15 показан интерфейс программы, моделирующей полную адаптивную систему.

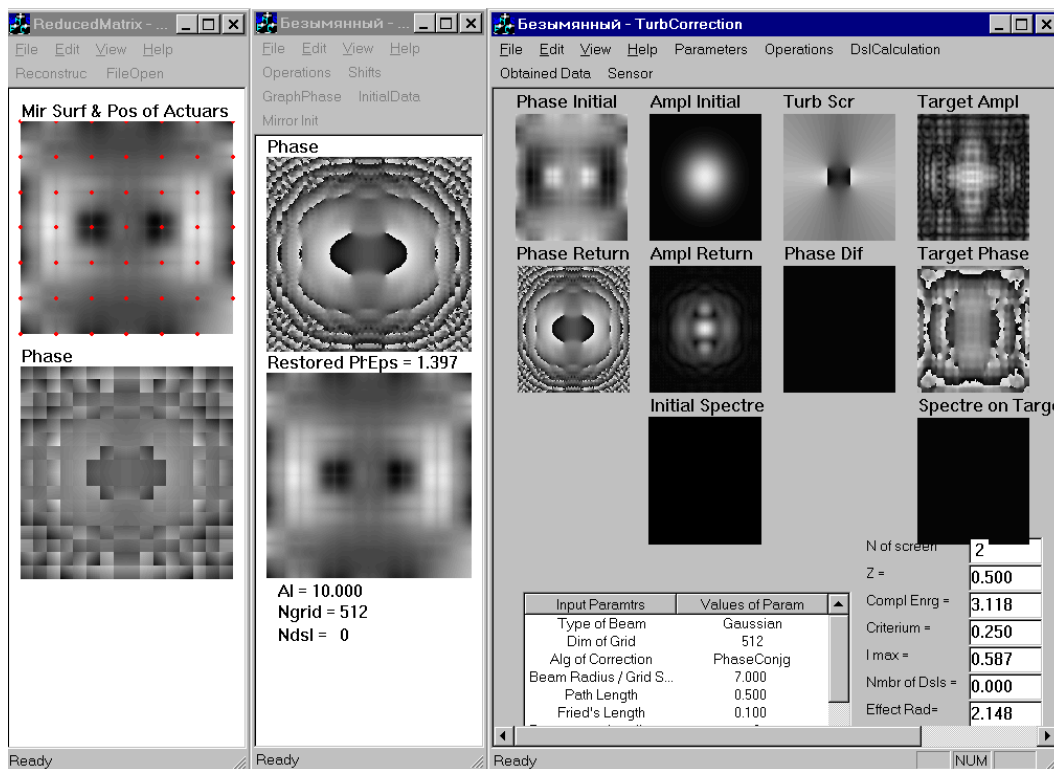


Рис. 15. Коррекция фазового экрана с искусственными дислокациями при использовании полной модели адаптивной системы. Расположение интерфейсов программ справа налево: модель зеркала, датчика, модель распространения пучка в искажающей среде

Результат коррекции – распределение поля, выводимое в окне Target Ampl. Сравнивая его с соответствующим окном интерфейса (см. рис. 12), видим, что в отличие от предыдущего случая фокусировка пучка в рассматриваемой системе не достигается. Вероятно, что причиной этого является введенный в систему элемент, т.е. адаптивное зеркало.

Эффективность компенсации турбулентного экрана с использованием полной модели иллюстрируется на рис. 16.

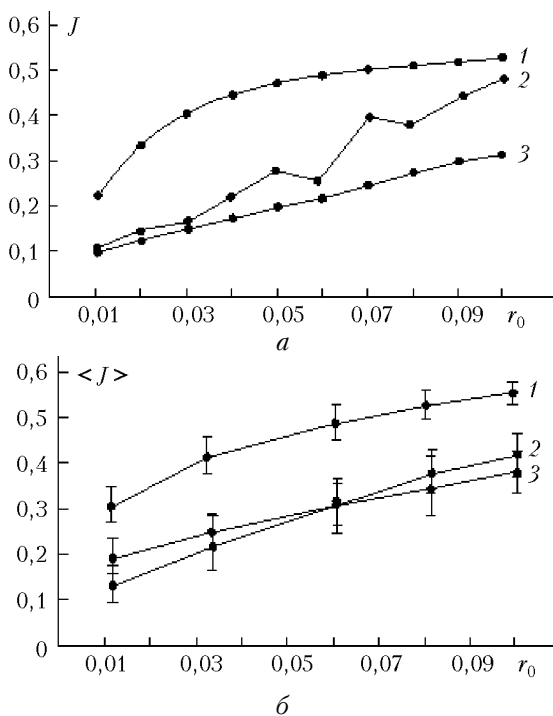


Рис. 16. Эффективность системы фазового сопряжения, включающей датчик Гартмана, работающий на основе модифицированного алгоритма сшивки, и упругое зеркало. Данные для одной из реализаций (а) и усредненные результаты (б)

Искажающий экран был помещен в середине трассы, в опорном пучке присутствовали особые точки. Можем видеть, что зависимость критерия фокусировки от интенсивности турбулентных искажений на отдельной реализации является немонотонной (кривая 2 на рис. 16,а). Напомним, что при идеальном зеркале была получена зависимость, в которой осцилляции критерия отсутствовали (см. рис. 13). Кроме того, ошибки, вносимые зеркалом, привели к снижению усредненных результатов. Это видно из сравнения рис. 13,б и 16,б.

Заключение

В настоящей статье впервые рассмотрена работа полной адаптивной системы, т.е. системы, включающей трассу распространения пучка, датчик волнового фронта и упругое зеркало. Приводимые результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Точность регистрации волнового фронта без особых точек датчиком Гартмана зависит от числа

его субапертур. С другой стороны, увеличение размерности линзлета датчика приводит к снижению его динамического диапазона. Поэтому для датчика не существует однозначной зависимости между точностью и размерностью.

2. При наличии дислокаций возможность регистрации фазового профиля пучка датчиком определяется используемым алгоритмом сшивки сегментов. В работе предложен алгоритм сшивки, позволяющий регистрировать волновой фронт, имеющий разрывы.

3. Введение модифицированного алгоритма сшивки позволяет с достаточно высокой эффективностью компенсировать турбулентные искажения излучения системой, включающей датчик и идеальное (задающее фазовый профиль без ограничений) зеркало.

4. Введение в адаптивную систему упругого зеркала с числом степеней свободы, составляющим несколько десятков (около 50) не приводит к снижению эффективности коррекции турбулентных искажений, в случаях, когда дислокации отсутствуют. Использование корректора с меньшим количеством сервоприводов (20 и менее) может вызвать уменьшение эффективности управления пучком.

5. Если в систему входит зеркало с непрерывной отражающей поверхностью и относительно небольшим (около 50) числом степеней свободы, то наличие особых точек в фазовом профиле опорного пучка приводит к снижению качества компенсации турбулентных искажений излучения. Причиной этого является именно зеркало, так как датчик Гартмана с модифицированным алгоритмом сшивки сегментов достаточно точно работает в данных условиях.

1. *Fried D.L., Vaughn J.L.* Branch cuts in the phase function // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. N 15. P. 2865–2882.
2. *Barchers J.D., Fried D.L., and Link D.J.* Evaluation of the performance of Hartmann sensors in strong scintillation // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 6. P. 1012–1021.
3. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Мakenова Н.А.* Регистрация фазового профиля когерентного излучения и реализация адаптивного управления лазерным пучком при наличии особых точек в волновом фронте // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15. № 11. С. 1018–1026.
4. *Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova N.A.* Analysis of adaptive correction efficiency with account of limitations induced by Shack–Hartmann sensor // *Proc. SPIE.* 2002. V. 5026. P. 190–197.
5. *Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova N.A.* Limitations of adaptive control efficiency due to singular points in the wavefront of a laser beam // *Proc. of Intern. Conf. «Remote sensing».* Greece. 2002. P. 52.
6. *Roggemann M.C., Koivunen A.C.* Wave-front sensing and deformable-mirror control in strong scintillation // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2000. V. 17. N 5. P. 911–919.
7. *Roggemann M.C., Koivunen A.C.* Branch-point reconstruction in laser beam projection through turbulence with finite-degree-of-freedom phase-only wave front correction // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2000. V. 17. N 1. P. 53–62.
8. *Dente G.C.* Speckle imaging and hidden phase // *Appl. Opt.* 1999. V. 39. N 10. P. 1480–1484.

9. *Fried D.L.* Complex exponential reconstructor with RMS-noise weighted error-reduction: A solution to the branch point reconstruction problem. Report No. TN-092. 1999.
10. *Fried D.L.* Using the hidden phase formulation in wave front reconstruction. Report No. TN-100. 1999.
11. *Noll R.J.* Zernice polynomials and atmospheric turbulence // *J. Opt. Soc. Amer.* 1976. V. 66. N 3. P. 207–211.
12. *Канев Ф.Ю., Чесноков С.С.* Зависимость эффективности коррекции тепловой линзы от базиса координат управления // *Оптика атмосфер.* 1991. Т. 4. № 9. С. 983–986.
13. *Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova N.A.* Detection of dislocations as branching points of interference pattern // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4357. P. 231–235.
14. *Kanev F.Yu., Lukin V.P., Lavrinova L.N.* Algorithms of localization and statistics of dislocations on the path of laser beam propagation // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4357. P. 244–249.
15. *Канев Ф.Ю., Лукин В.П., Макенова Н.А.* Принципиальные ограничения алгоритма фазового сопряжения и реализация амплитудно-фазового управления в двухзеркальной адаптивной системе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15. № 12. С. 1073–1077.

F.Yu. Kanev. Detection of singular wave front with a Hartman sensor. Efficiency of adaptive system including this sensor.

This paper considers the effect of two key elements of an adaptive system: Shack–Hartman sensor and flexible mirror, on the efficiency of correction of atmospheric turbulence. In particular, the wave front restoration by the sensor has been analyzed for the conditions that the phase of the reference radiation has no singularities and in the presence of dislocations. It is shown that the appearance of singular points not always leads to losses in accuracy of phase detection and in stability of adaptive control in the system including a real sensor and an ideal mirror. On the other hand, the use of the real mirror with a continuous reflecting surface under such conditions leads to the loss in beam control stability.