

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ ВИХРЕВОГО ПУЧКА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЧИСЛА И ПОРЯДКА ОСОБЫХ ТОЧЕК

Ф.Ю. Канев^{1,2}, В.П. Аксенов², И.В. Измайлов³, Ф.А. Стариков⁴

¹Томский политехнический университет

E-mail: mna@iao.ru

²Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: avp@iao.ru

³Томский государственный университет

E-mail: izmi@elefot.tsu.ru

⁴Российский федеральный ядерный центр, г. Саров

E-mail: fstar@rol.ru

Представлены результаты восстановления сингулярной фазы когерентного излучения из наклонов волнового фронта, полученных с использованием численной модели датчика Гартмана. Восстановление выполнялось для случаев, когда волновой фронт пучка включал большое число (более ста) особых точек или особые точки высоких (более десятого) порядков. Показано, что наибольшую точность реконструкции в данных условиях обеспечивает алгоритм, разработанный на основе предложенной Д. Фридом методики. Также установлено, что дальнейшее увеличение точности может быть получено за счет использования в оптической схеме датчика операции сканирования.

Ключевые слова:

Дислокации волнового фронта, сингулярный фазовый профиль, алгоритм реконструкции фазы, датчик волнового фронта.

Key words:

Wave front dislocation, singular phase profile, phase reconstruction algorithm, wave front sensor.

1. Восстановление сингулярной фазы.

Современные методы решения проблемы

Для получения фазового профиля оптического излучения обычно используется датчик Гартмана [1, 2], прибор в котором волновой фронт разделяется на отдельные пучки матрицей фокусирующих микролинз. Каждой микролинзе ставится в соответствие участок светочувствительного элемента, в пределах сформированной таким образом субапертуры вычисляются смещения «центра тяжести» образованного при делении пучка. Затем, по измерениям смещений вычисляются локальные наклоны волнового фронта, из которых на основе специального алгоритма восстанавливается фазовый профиль излучения.

Конечные размеры каждой из субапертур приводят к ограничениям описанной выше методики. Локальные наклоны могут быть измерены только в пределах площадки, поставленной в соответствие микролинзе. При выходе сфокусированного пучка из этой области возникают ошибки измерения наклонов, приводящие к погрешностям восстановления фазы.

Динамический диапазон прибора может быть расширен при использовании операции сканирования. В этом случае в каждый момент времени открыта только одна из микролинз, остальные элементы матрицы экранированы. При выполнении измерений линзы последовательно открываются. В построенном таким образом сканирующем датчике наклоны вычисляются не в пределах субапертуры, а во всей светочувствительной области, что означает значительное расширение пределов измерения. Основными недостатками сканирующего датчика является его малое быстродействие и сложность аппаратной реализации.

Для обоих типов датчиков восстановление фазы значительно осложняется при появлении в пучке дислокаций (оптических вихрей), точек в которых интенсивность равна нулю и интеграл по контуру, охватывающему такую точку, принимает значения $\pm 2\pi$.

К настоящему времени построено несколько алгоритмов, предназначенных для регистрации сингулярной фазы [3, 4], изучены особенности их применения [5, 6], проведен сравнительный анализ точности [7], опубликован ряд экспериментальных результатов по реконструкции волнового фронта вихревого излучения [8]. Несмотря на большое количество публикаций, проблему невозможно считать решенной полностью. Необходимо отметить, что в теоретических исследованиях [3–6] фаза восстанавливалась из градиентов, полученных аналитически или при численном дифференцировании, а это означает, что ограничения, свойственные реальному прибору учтены не были. В экспериментальных исследованиях [8] демонстрировалась лишь принципиальная возможность регистрации, т. к. волновой фронт пучка включал только одну дислокацию.

Предметом исследований, описанных в данной статье, являлось изучение особенностей работы датчика Гартмана при увеличении числа дислокаций до ста и более, а также при увеличении порядка особых точек. Наклоны волнового фронта были получены в численных экспериментах с использованием модели, соответствующей реальному прибору, т. е. с учетом ограничений датчика. Восстановление фазы выполнялось на основе алгоритма, предложенного Д. Фридом [4] и двух алгоритмов, построенных авторами статьи.

2. Алгоритмы реконструкции

Один из алгоритмов (комплексный экспоненциальный реконструктор со взвешиванием дисперсии), использованных нами для восстановления сингулярной фазы из наклонов волнового фронта, был построен на основе методики, предложенной Д. Фридом [4]. В алгоритме Фрида задача восстановления фазы сводится к задаче реконструкции в поперечном сечении пучка распределения «фазоров» – комплексных чисел, задаваемых формулами $\Delta_x u \equiv A \cdot \exp(i\Delta_x \varphi)$ и $\Delta_y u \equiv B \cdot \exp(i\Delta_y \varphi)$, где $\Delta_x \varphi$, $\Delta_y \varphi$ – разности фаз излучения между соседними узлами расчётной сетки, A , B – амплитуды фазоров.

Особенностью рассматриваемого алгоритма является использование единичных векторов $\Delta_x u$ и $\Delta_y u$ (комплексных чисел с единичным модулем), для получения которых амплитудам A и B присваиваются значения, равные единице. Можно предположить, что при выполнении этой операции теряются данные, т. к. амплитуды дифференциальных «фазоров» несут информацию об ошибках измерения разностей фаз в конкретном эксперименте. С учетом этого предположения была предпринята попытка модификации алгоритма, которая состояла в исключении операции формирования единичных комплексных векторов.

Как известно, качество восстановления сингулярной фазы снижается с увеличением количества вихрей N_{dsi} , содержащихся в волновом фронте излучения. При этом характеристикой, влияющей на точность, является плотность вихрей N_{dsi}/N_g (где N_g – число ячеек расчётной сетки). С увеличением плотности увеличивается средний по поперечному сечению модуль градиента фазы ∇S_{\perp} и возникают погрешности интегрирования.

Для того, чтобы повысить качество реконструкции сингулярной фазы и увеличить отношение числа регистрируемых дислокаций к общему числу особых точек, был разработан комбинированный алгоритм, в котором составляющая градиента фазы, обусловленная вихрями, положение и заряд которых был определен, вычиталась из общего поля градиентов. После выполнения операции вычитания количество вихрей уменьшается, за счет этого авторы надеялись уменьшить погрешности восстановления.

Для исследования точности работы перечисленных выше алгоритмов использовалась модель датчика Гартмана, описанная в наших предыдущих публикациях [9]. Модель точно соответствовала оптической схеме реального прибора, локальные наклоны в ней вычислялись по смещениям энергетических центров тяжести пучков, сфокусированных набором микролинз. В расчетной схеме также была предусмотрена возможность изменения фокусного расстояния и размерности раstra и изменение размерности светочувствительного элемента (фактически, это было изменение размерности расчётной сетки). Полученные в численных экспериментах результаты представлены ниже.

3. Восстановление фазы из наклонов, измеренных датчиком Гартмана

Точность восстановления фазы из наклонов волнового фронта, полученных с использованием модели датчика Гартмана, иллюстрируется на рис. 1, где представлена зависимость критерия Штреля Sh от числа особых точек первого порядка, введенных в волновой фронт плоской волны.

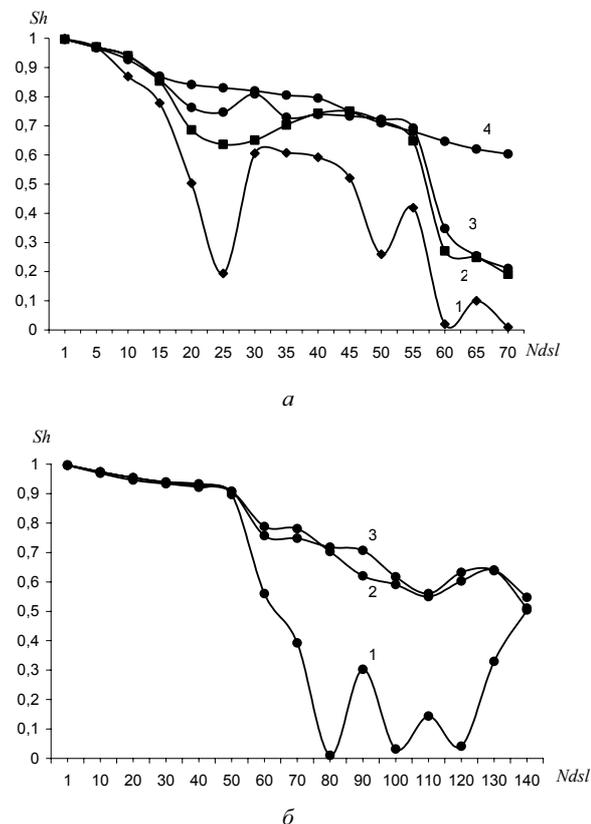
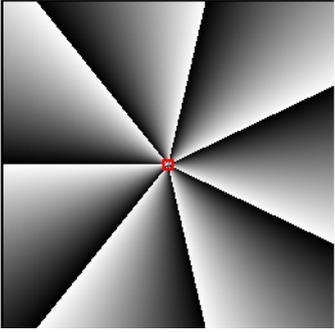
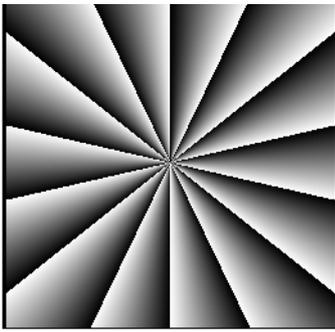
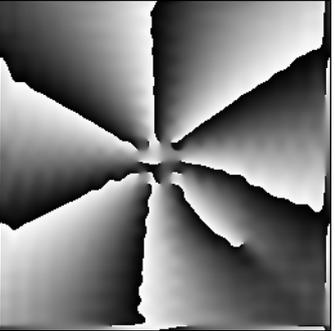
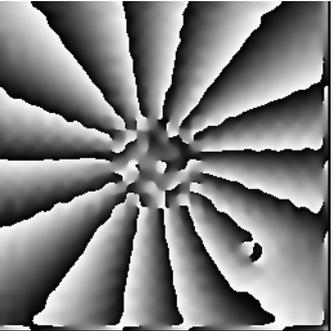
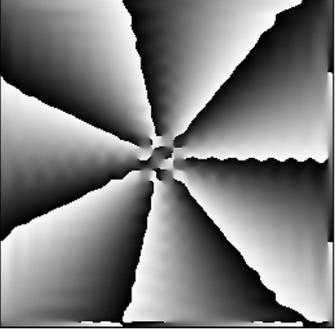
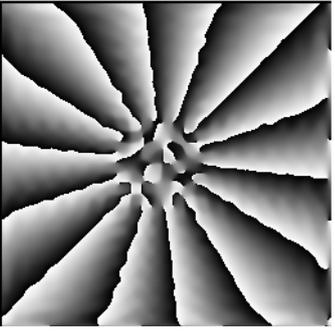


Рис. 1. Зависимость критерия Штреля Sh от числа дислокаций N_{dsi} , введенных в фазовый профиль пучка. Регистрация наклонов выполняется датчиком Гартмана с размерностью линзового раstra 32×32 (а) и 64×64 (б)

Результаты получены для модели, работающей на основе алгоритма Фрида (кривая 1), модифицированного алгоритма Фрида (2) и комбинированного алгоритма (3). Также на рисунке приведены данные, полученные с использованием сканирующего датчика (кривая 4). Различие между рис. 1, а и б, состоит в использовании растров микролинз различной размерности. Можем видеть, что во всех случаях с увеличением числа дислокаций точность восстановления уменьшается. Для датчика с растром 32×32 алгоритм Фрида работает неустойчиво при 10 и более дислокациях, применение раstra 64×64 обеспечивает устойчивость в интервале от 0 до 50 дислокаций, т. е. за счет увеличения размерности диапазон возможного применения датчика значительно расширяется.

Модифицированный и комбинированный алгоритмы позволяют получить приблизительно одинаковые и значительно более высокие результаты, по сравнению с оригинальным алгоритмом Фрида.

Таблица. Восстановление сингулярной фазы, включающей дислокацию высокого порядка на основе модифицированного алгоритма Фрида. Размерность линзового растра 32×32 , размерность расчетной сетки 256×256

Порядок особой точки	7	14
Заданный профиль		
Полученный профиль (обычный датчик)		
Полученный профиль (сканирующий датчик)		

Представленные данные позволяют заключить, что два возможных метода увеличения точности датчика – это увеличения размерности растра и оптимизация алгоритма реконструкции фазы.

Точность работы датчика уменьшается также при увеличении порядка особых точек. Это особенно иллюстрируется результатами численных экспериментов по регистрации волнового фронта, включающего одну дислокацию, порядок которой изменялся (данные помещены в таблице).

Здесь приводится полутоновое изображение заданного фазового профиля, изображение профиля, восстановленного с использованием датчика Гартмана, работающего на основе модифицированного алгоритма Фрида, и с использованием сканирующего датчика. Можно видеть, что во всех случаях отличие полученной фазы от заданной увеличивается с ростом порядка особой точки.

Увеличение отклонения достаточно просто объяснить для обычного датчика. В окрестностях

дислокации сфокусированные набором микролинз пучки попадают в области соседних субапертур. Это видно на гармтаннограммах, полученных для дислокаций 7-го и 14-го порядков (рис. 2). В результате локальные наклоны определяются неправильно, и фаза восстанавливается неточно. Но в чем источник ошибок, характерных для сканирующего датчика, где смещения центроидов определяются на всей плоскости регистрации?

Пучки, сфокусированные 4-я центральными субапертурами сканирующего датчика, показаны на рис. 3 (дислокация 14-го порядка находится в центре). Очевидно, что источником ошибок в этом случае является деформация сфокусированных пучков, т. е. отличие их амплитудного распределения от правильного круга. Координаты центров тяжести отличаются от координат, вычисленных для пучков правильной формы, что и ведет к появлению погрешностей. Таким образом, использование сканирующего датчика не позволяет получить радикаль-

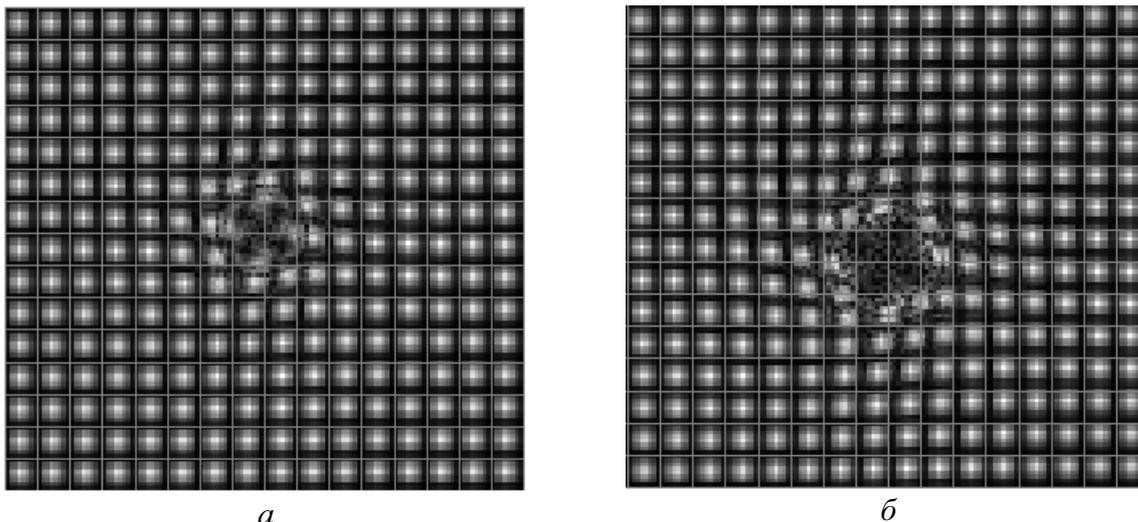


Рис. 2. Центральная область гартманограмм, полученных при введении в фазовый профиль дислокации 7-го (а) и 14-го (б) порядков. Размерность линзового раstra датчика 32×32

ного увеличения точности регистрации фазы пучка, несущего вихрь высокого порядка. Недостатки прибора, такие, как малое (по сравнению с обычным датчиком) быстродействие и сложность практической реализации не компенсируются повышением качества реконструкции волнового фронта.

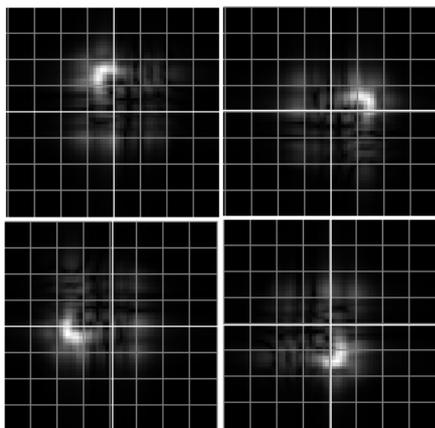


Рис. 3. Пучки, сфокусированные центральными субапертурами сканирующего датчика. Размерность раstra 32×32. Дислокация 14-го порядка помещена в центр области исследования

Количественные характеристики точности восстановления приводятся на рис. 4 в виде зависимости критерия Штреля от порядка особой точки; восстановление фазы из наклонов осуществляется на основе модифицированного алгоритма Фрида. При выборе размерности раstra 32×32 размерность расчетной сетки составляла 256×256; увеличение размерности раstra до значений 64×64 сделало необходимым увеличение размерности расчетной сетки до 512×512.

По результатам, представленным на рис. 4, можно заключить, что как для обычного, так и для

сканирующего датчика точность регистрации фазы уменьшается с ростом порядка особой точки (кривые 1 и 2 на рис. 4). Отличие состоит в том, что сканирующий датчик работает более устойчиво, непредсказуемых колебаний критерия Штреля не наблюдается.

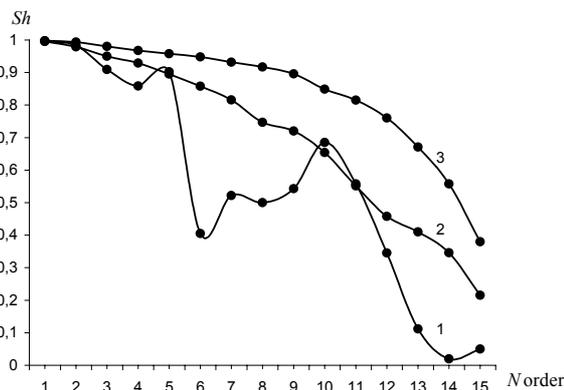


Рис. 4. Зависимость критерия Штреля от порядка дислокации, введенной в фазовый профиль пучка. Регистрация наклонов выполняется датчиком Гартмана с размерностями линзового раstra 32×32 (кривая 1) и 64×64 (3), а также сканирующим датчиком с растром 32×32 (2)

Увеличить точность регистрации возможно при увеличении разрешения светочувствительного элемента обычного датчика, при увеличении размерности его раstra, или при уменьшении фокусного расстояния микролинз. Данные выводы следуют из анализа прибора с размерностью раstra 64×64 и уменьшенным фокусным расстоянием (кривая 3 на рис. 4). Увеличению разрешения в этом случае соответствует увеличение размерности расчетной сетки до значений 512×512. Полученные значения критерия выше, чем для обычного и сканирующего датчиков меньшей размерности.

Заключение

Выполнен анализ точности восстановления сингулярного волнового фронта из локальных наклонных, полученных с использованием моделей обычного и сканирующего датчиков Гартмана. Для восстановления использовался алгоритм Фрида, его модификация, разработанная авторами, и комбинированный алгоритм. Показано, что во всех случаях точность уменьшается при увеличении числа особых точек или их порядка, причем лучшие результаты получены при использовании модифицированного и комбинированного алгоритмов,

обеспечивающих приблизительно одинаковое качество восстановления.

Повысить точность возможно также за счет увеличения разрешения светочувствительного элемента датчика, размерности его раstra и при уменьшении фокусного расстояния микролинз.

Использование сканирующего датчика расширяет диапазон условий для применения прибора, но и в этом случае наблюдаются ошибки восстановления фазовых профилей, включающих дислокации высоких порядков или большое количество дислокаций первого порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wenhan Jiang, Xuejun Rao, Zeping Yang, Ning Ling. Applications of Hartmann-Shack Wavefront Sensors // Proc. of SPIE. – 2005. – V. 6018. – P. 60180N-1–60180N-9.
2. Lee J.H., Kang U.K., Lee Y.C., Cheong H.J. Investigation into the validity of Shack-Hartmann Sensor for Practical applications: Intensity Variations // Proc. of SPIE. – 2005. – V. 6018. – P. 60180S-1–60180S-9.
3. Aksenov V.P., Tikhomirova O.V. Theory of singular-phase reconstruction for an optical speckle field in the turbulent atmosphere // J. Opt. Soc. Amer. – 2002. – V. 19. – № 2. – P. 345–355.
4. Fried D.L. Adaptive optics wave function reconstruction and phase unwrapping when branch points are present // Optics Communications. – 2001 – V. 200. – P. 43–72.
5. Банах В.А., Фалиц А.В. Восстановление фазы из ее главного значения // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19. – № 12. – С. 1033–1036.
6. Банах В.А., Фалиц А.В. Восстановление фазы оптического поля из ее градиента при наличии точек ветвления // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19. – № 12. – С. 1037–1041.
7. Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu., Starikov F.A. Localization of optical vortices and reconstruction of wavefront with screw dislocations // Proc. of SPIE. – 2005. – V. 5894. – P. 68–78.
8. Starikov F.A., Aksenov V.P., Izmailov I.V., Kanev F.Yu., Kochemarov G.G., Kulikov S.M., Manachinsky A.N., Maslov N.V., Ogorodnikov A.V., Sukharev S.A. Wave front sensing of an optical vortex and its correction with the help of bimorph mirror // Adaptive Optics for Industry and Medicine: Proc. of the 6-th Intern. Workshop. – Galway, Ireland, 2007. – P. 150–151.
9. Канев Ф.Ю. Регистрация сингулярного волнового фронта с использованием датчика Гартмана. Эффективность адаптивной системы, включающей датчик // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 12. – С. 904–912.

Поступила 05.03.2009 г.