

Ю. В. Корниенко, В. В. Пугач, С. И. Скуратовский
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: pvv@ire.kharkov.ua

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЛУЧЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Влияние атмосферы на результаты астрономических наблюдений с поверхности Земли существенно снижает разрешение получаемых изображений. Многие методы борьбы с ним требуют информации об атмосферных искажениях. Получение такой информации на практике производится с помощью специальных датчиков волнового фронта, работающих по опорной звезде, естественной или лазерной. Однако имеется способ получать информацию о фазовых искажениях в атмосфере непосредственно в процессе наблюдения произвольного объекта многолучевым интерферометром. Усредненные по субапертурам фазы являются побочным продуктом построения изображения таким инструментом. С помощью интерполяции по ним можно восстановить распределение фазовых искажений по апертуре. Показано, что точность реконструкции является приемлемой, когда атмосферные неоднородности больше расстояния между субапертурами. Приведены зависимости точности реконструкции от характерного размера неоднородностей и среднеквадратичного отклонения фазовых искажений. Результаты исследований могут оказаться полезными как при исследовании атмосферы, так и в борьбе с ее влиянием, например при проведении адаптивной коррекции первого порядка. Ил. 4. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: астрономические наблюдения, фазовые искажения, многолучевой интерферометр, диагностика состояния атмосферы, адаптивная оптика.

На протяжении долгого времени единственным источником наших знаний об астрономических объектах были наблюдения, проводимые с помощью оптических или радиотелескопов с поверхности Земли, т. е. сквозь толщу земной атмосферы. Но и теперь, в эпоху космических исследований, такие наблюдения остаются главным источником информации об удаленных объектах из-за ограниченных возможностей выведения телескопов на околоземную орбиту. Между тем наблюдения сквозь земную атмосферу, особенно в коротковолновой части электромагнитного спектра, подвержены сильному мешающему влиянию фазовых искажений, возникающих вследствие наличия в атмосфере случайных неоднородностей показателя преломления. Это приводит к существенной потере разрешающей способности телескопа, особенно в оптическом диапазоне: фактически большой оптический телескоп (диаметром в несколько метров) позволяет получить разрешение порядка 1", что соответствует дифракционному разрешению телескопа диаметром 20 см. Поэтому преодоление мешающего влияния земной атмосферы стало одной из самых актуальных задач наблюдательной астрономии.

Существуют различные пути решения этой проблемы, связанные как с обработкой уже зарегистрированного изображения, так и с изменением способа его формирования. К последнему относится интерферометрический способ формирования изображения, на рассмотрении которого мы остановимся подробнее.

1. Интерферометрический способ формирования изображения. В 1862 г. Физо предложил двулучевой интерферометр для измерения диаметров звезд, не разрешимых при обычных астрономических наблюдениях [1]. Эту идею

удалось практически осуществить в 1921 г. Майкельсону [2] с помощью созданного им инструмента, который теперь называют звездным интерферометром Майкельсона.

Развитием этой идеи является многолучевой интерферометр, предложенный в работах [3, 4] и более подробно описанный в работе [5]. Входная апертура этого интерферометра состоит из большого числа субапертур, и интерференционная картина создается всеми парами, которые образуются субапертурами. Поэтому она представляет собой наложение многих систем полос, каждая со своим периодом и своей ориентацией, аналогичная системе полос в интерферометре Майкельсона.

Реальная возможность уменьшить влияние атмосферных искажений при наблюдении с помощью многолучевого интерферометра (в отличие от интерферометра Майкельсона) превышает даже то, что может дать геометрическое усреднение. Это связано с тем, что фазовое искажение в атмосфере является функцией координат в плоскости наблюдателя. Каждой субапертуре интерферометра можно поставить в соответствие в данный момент времени некоторое значение фазового искажения, которое оказывает влияние на все фурье-компоненты изображения, передаваемые с участием данной субапертуры. Поэтому связь между истинными фазами фурье-компонент изображения и измеренными значениями фаз функции когерентности становится более жесткой. Появляется возможность найти неискаженные фазы путем решения системы уравнений

$$\varphi_v + \delta_i - \delta_k = \psi_\mu \quad (1)$$

где φ_v – истинное значение; ψ_μ – измеренное значение фазы фурье-компоненты функции коге-

рентности на паре субапертур с номерами i, k ; δ_i и δ_k – фазовые искажения на соответствующих субапертурах.

Если апертура интерферометра состоит из n субапертур и передает m пространственных частот, эта система содержит $n(n-1)/2$ уравнений с $m+n$ неизвестными (m фаз фурье-компонент изображения и n фазовых искажений). Легко видеть, что с ростом n возможны такие конфигурации апертуры, для которых эта система содержит достаточно уравнений и является определенной. Это позволяет полностью исключить фазовые искажения из результатов измерения и восстановить истинные значения фаз фурье-компонент изображения с точностью, ограниченной лишь величиной шума регистрации.

2. Вычисление атмосферных фазовых искажений по результатам наблюдения многолучевым интерферометром. Решением линейных уравнений (1) возможно получить не только истинные фазы фурье-компонент изображения, но и распределение фаз в атмосфере. Другими словами, используя интерферометрический телескоп для наблюдения заатмосферного объекта, мы можем судить о состоянии атмосферы.

Как было сказано выше, система уравнений (1) для правильно выбранных конфигураций интерферометра является определенной [5]. В реальном случае всегда присутствует шум регистрации. Система уравнений (1) в таком случае становится несовместной, но метод наименьших квадратов позволяет найти наиболее вероятные значения неизвестных. При этом, как показали детальные исследования [6, 7], обусловленность системы оказывается весьма высокой. Решение, полученное методом наименьших квадратов, содержит наиболее вероятные значения как фаз фурье-компонент изображения объекта, являющиеся целью наблюдения, так и фазовых искажений, усредненных по субапертурам, которые обычно являются побочным результатом наблюдения. Но вместо того чтобы отбрасывать их, следовало бы извлечь пользу из знания этих значений, например, для диагностики текущего состояния атмосферы.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование точности определения поля фазовых искажений по данным, полученным в процессе обработки результатов наблюдения произвольного объекта с помощью многолучевого интерферометра, при различных параметрах атмосферы.

3. Оценка возможностей определения фазовых искажений с помощью компьютерного эксперимента. Для исследования возможностей интерферометрического метода формирования изображений была создана компьютерная модель, описанная более подробно в работах [8, 9].

Чтобы проверить возможность диагностики состояния атмосферы путем наблюдения заатмосферного объекта с помощью многолучевого интерферометра, была проведена серия экспериментов по компьютерному моделированию этой процедуры. Конфигурация входной апертуры интерферометра была выбрана из соображений удобства диагностики, а не астрономических наблюдений. В рамках данного эксперимента она представляла собой однородный квадратный массив из 5×5 субапертур (каждая представляет собой рефлектор размером порядка 250 мм), расположенных в узлах квадратной решетки. Таким образом, ставилась задача определить картину фазовых искажений в пределах входной апертуры интерферометра с пространственным разрешением 5×5 элементов.

Эксперимент начинался с генерирования поля псевдослучайных фазовых искажений в квадратной области, несколько большей, чем апертура интерферометра. В дальнейшем при выдаче промежуточных и окончательных результатов из этой области вырезался только квадрат, заполненный апертурой интерферометра.

В качестве модели атмосферных фазовых искажений был выбран стационарный гауссов процесс с соответствующей формой энергетического спектра, т. е. с шириной, соответствующей заданному размеру атмосферных неоднородностей. Подробнее о моделировании атмосферы гауссовым случайным процессом можно прочесть в работе [10].

Пример поля фазовых искажений приведен на рис. 1, а (будем называть его истинным). Для отображения фаз здесь используется шкала оттенков серого, которая приведена справа от рисунков. Отображение числовой оси фазы на шкалу оттенков является циклическим, т. е. значениям фазы, отличающимся между собой на $2\pi n$ (при любом n), соответствует один и тот же оттенок. Затем моделировалось наблюдение объекта сквозь такую атмосферу с помощью интерферометра описанной выше конфигурации.

В результате наблюдения и последующей обработки мы имеем искомую функцию, известную только в узлах квадратной решетки. Согласно теореме Найквиста-Котельникова этот набор значений определяет искомую функцию только в пределах той части ее спектра, которая ограничена сверху частотой, соответствующей периоду, равному удвоенному периоду решетки.

Чтобы иметь возможность объективно сравнить полученный результат с истинным полем фазовых искажений, из последнего надо выделить ту же часть пространственного спектра, которая присутствует в окончательном результате. Результат этой процедуры показан на рис. 1, б (назовем его эталонным полем фазовых искажений). Можно

видеть его отличие от поля фазовых искажений, приведенного на рис. 1, а (среднеквадратичное отклонение $\varepsilon_{\text{зи}} = 0,65$ рад). Результат реконструкции (реконструированное поле фазовых искажений) иллюстрирует рис. 1, в. Видно неплохое совпадение с эталонным полем фазовых искажений ($\varepsilon_{\text{рз}} = 0,98$ рад). При этом характерный размер атмосферных неоднородностей l и среднеквадратичное значение атмосферных искажений q

выбраны для ситуации при наблюдении в местах со средним астроклиматом (например, специальная астрофизическая обсерватория РАН).

На рис. 2 показан результат эксперимента при большем уровне и другой реализации фазовых искажений атмосферы. И, как видно, результат реконструкции (рис. 2, в) все так же подобен эталонному (рис. 2, б), хотя погрешность реконструкции существенно выше ($\varepsilon_{\text{рз}} = 3,02$ рад).

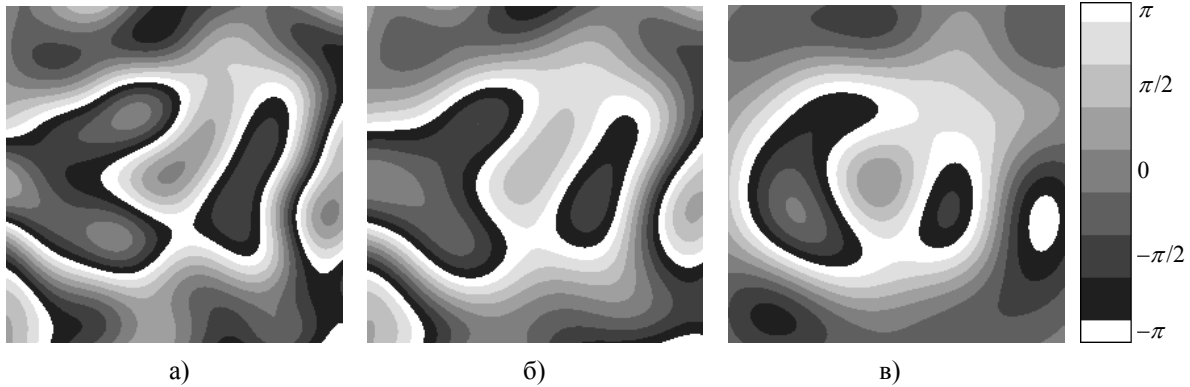


Рис. 1. Истинное (а), эталонное (б) и реконструированное (в) фазовые поля при $l \sim D/7$ и $q = \pi$

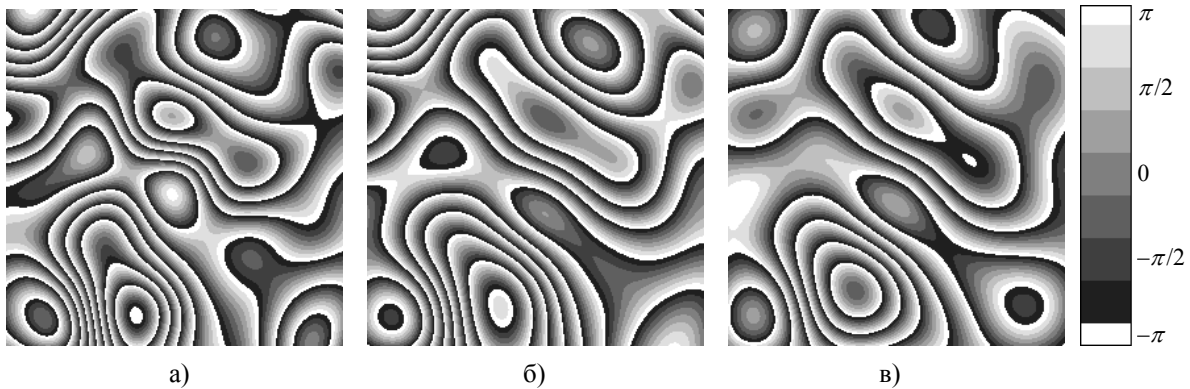


Рис. 2. Истинное (а), эталонное (б) и реконструированное (в) фазовые поля при $l \sim D/7$ и $q = 3\pi$

В первом случае (рис. 1) среднеквадратичное значение фазовых искажений составляло $q = \pi$, что соответствует очень хорошей атмосфере. Во втором случае (рис. 2) $q = 3\pi$, т. е. полторы длины волны. Такое значение можно считать типичным при наблюдении с помощью оптического телескопа средних размеров при среднем состоянии атмосферы в местах с хорошим, но не рекордным астроклиматом.

В описываемой серии экспериментов моделирование было проведено для разных среднеквадратичных значений фазовых искажений и характерных размеров атмосферных неоднородностей: от большого, порядка полного размера апертуры D , до малого, меньше размера субапертуры d . К сожалению, объем статьи не позволяет представить все результаты в виде фазо-

вых полей, поэтому на рис. 3 приведены зависимости среднеквадратичной погрешности реконструкции $\varepsilon_{\text{рз}}$ (которая представляет собой среднеквадратичное отклонение реконструированного фазового поля от эталонного) от среднеквадратичного значения фазовых искажений (рис. 3, а) и числа a , определяющего ширину спектра фазового поля и характеризующего размер неоднородностей l ($a = 0,2$ соответствует $l \sim D/2$, $a = 0,08 - l \sim D/4$, $a = 0,05 - l \sim D/7$, $a = 0,02 - l \sim d$, $a = 0,008 - l \sim d/2$). Легко видеть, что с возрастанием l (убыванием a) и q погрешность монотонно возрастает.

Результаты реконструкции для случая, когда размер атмосферных неоднородностей вдвое меньше размера субапертуры ($l = 150$ мм), иллюстрирует рис. 4. Среднеквадратичное значение фазовых искажений при этом $q = 2\pi$.

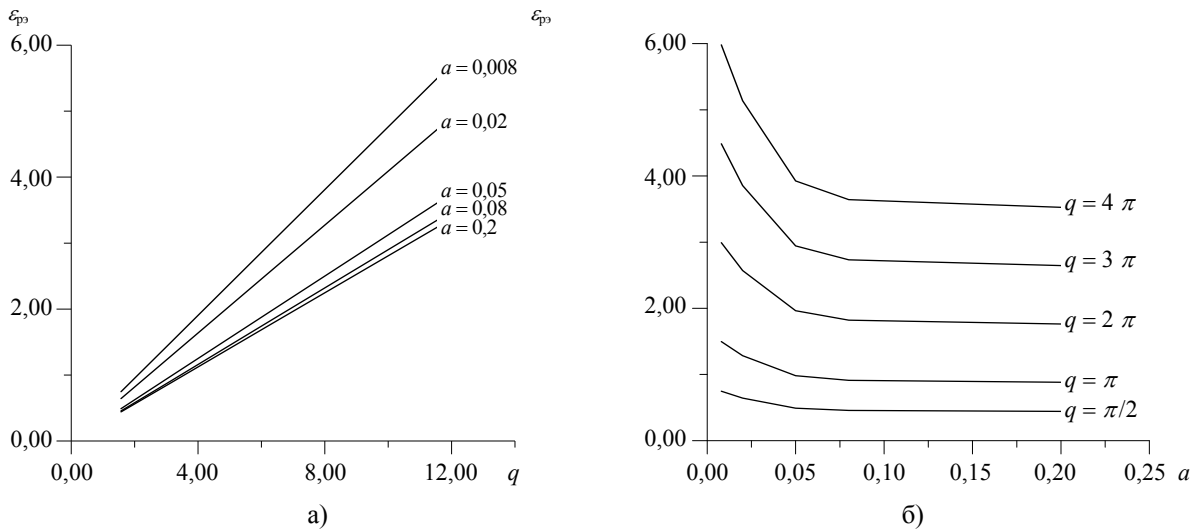


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной погрешности реконструированного изображения относительно эталонного от q при различных a (а) и от a при различных q (б)

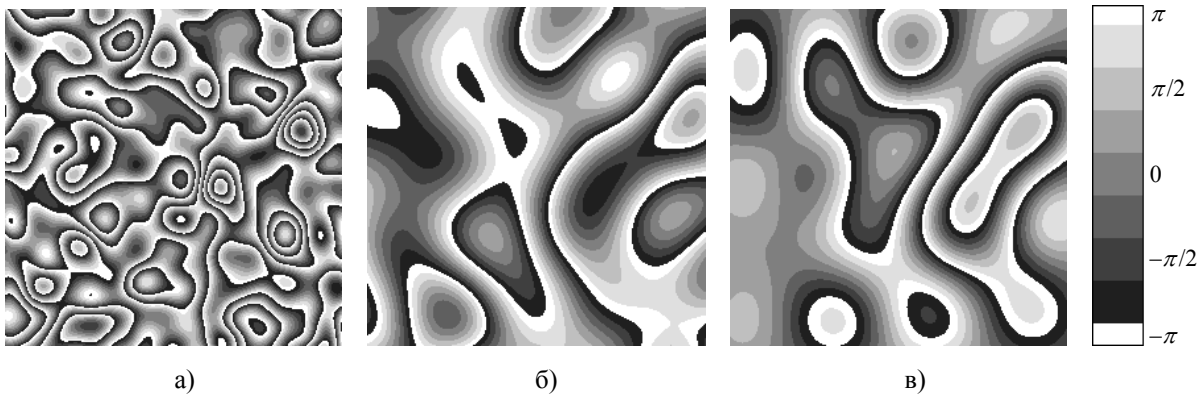


Рис. 4. Истинное (а), эталонное (б) и реконструированное (в) фазовые поля при $l \sim d/2$ и $q = 2\pi$

На рис. 4, а представлена истинная атмосфера, на рис. 4, б – эталонная, а на рис. 4, в – реконструированная. Сразу видно существенное отличие эталонной атмосферы от истинной ($\varepsilon_{\text{и}} = 4,76$ рад). Реконструированное фазовое поле также заметно больше отличается от эталонного ($\varepsilon_{\text{рз}} = 2,21$ рад).

4. Адаптивная коррекция фазового наклона фронта волны на субапертуре. После определения возможностей реконструкции фазового поля по наблюдениям многолучевым интерферометром возникает вопрос об области применения полученных результатов. Использование их в качестве статистических данных при исследовании астроклимата было бы весьма полезным, особенно если учесть, что данные о фазовых искажениях являются побочным продуктом наблюдения и не требуют дополнительного оборудования или специальных измерений. Но можно ли использовать полученные данные для более эффективной борьбы с мешающим влиянием атмосферы?

В настоящее время наиболее широко определение фазовых искажений фронта проходящей волны используется в телескопах с адаптивно-оптическими системами. Отслеживание состояния атмосферы осуществляется по опорной звезде датчиком волнового фронта (датчиком Гартмана) [11]. Однако возможна и иная ситуация. В работе [12] описана возможность использования метода накопления полных фаз при обработке интерферограмм. Отмечено, что эффективность метода можно повысить, если на каждой субапертуре интерферометра использовать адаптивную систему первого порядка. Применение отдельного датчика волнового фронта для каждой субапертуры (которых могут быть десятки) представляется и очень затратным, и неэффективным при наблюдении слабых объектов, поскольку датчик для работы требует деления светового потока.

Именно в такой ситуации оказывается полезным интерферометрический метод определения фазовых искажений. Хотя после решения

системы уравнений (1) мы имеем лишь значения фазовых искажений, усредненные по каждой субапертуре, после применения описанной в разд. 3 фильтрации получают необходимые для проведения адаптивной коррекции наклоны фазового поля.

В пользу применения описанного метода определения фазовых искажений говорит возможность использования одного и того же наблюдательного инструмента для получения информации и об объекте, и о состоянии атмосферы. Следует, однако, учитывать, что критерии выбора конфигурации входной апертуры интерферометра для формирования изображения и восстановления поля фазовых искажений различны. В первом случае обязательным условием является полное покрытие частотной области, причем частотные окна, передаваемые парами субапертур, не должны перекрываться (повторение одних и тех же окон разными парами допустимо, не допустимо частичное перекрытие окон). Это накладывает определенные требования на размеры субапертур и интервалы между ними. Но расстояние между центрами субапертур определяет верхнюю границу передаваемых частот и, следовательно, минимальный размер неоднородностей на реконструированном фазовом поле (см. разд. 3).

Возникает противоречие. Для более точного восстановления поля фазовых искажений желательно иметь субапертуры меньшего размера, но в большем количестве и с как можно более равномерным их распределением по апертурной плоскости. Не следует, однако, забывать, что с увеличением количества субапертур количество уравнений в системе (1) растет пропорционально n^2 . На формировании изображения с помощью метода накопления полных фаз уменьшение субапертур также сказывается положительно (повышается предельное значение среднеквадратичного отклонения q_0) [12], однако, в силу требования полного покрытия частотной плоскости, при этом повышается необходимое их количество, а значит, также возрастает объем вычислений. При этом конфигурации входной апертуры, обеспечивающие полное покрытие частотной плоскости, в апертурной плоскости совсем не равномерны, и для обеспечения равномерности требуется введение дополнительных субапертур. Таким образом, при выборе конфигурации входной апертуры интерферометра необходимо одновременно учитывать противоречивые требования.

Необходимо отметить, что метод накопления полных фаз предполагает получение изображения из последовательности интерферограмм, для каждой из которых в отдельности производится решение системы (1), формирование фазового поля и последующая коррекция его наклонов на субапертурах. Попутно для каждого кадра получается построенное интерферометрическим

методом изображение объекта. Однако интерферометрический метод в рассматриваемой реализации предполагает, что каждая субапертура передает всего лишь одну частоту спектра наблюдаемого объекта, в то время как метод накопления полных фаз лишен такого недостатка. Подробно вопрос об использовании метода накопления полных фаз при наблюдении с помощью многолучевого интерферометра рассмотрен в работе [12].

Выводы. Предложенный метод определения атмосферных фазовых искажений по наблюдениям с помощью многолучевого интерферометра обеспечивает восстановление поля фазовых искажений на апертуре интерферометра в процессе наблюдения.

Качество реконструкции связано с качеством исходных данных (например, уровнем шума регистрации), но также зависит от соотношения расстояния между субапертурами и характерного размера неоднородностей.

Следует обратить особое внимание на конфигурацию входной апертуры, которая должна одновременно удовлетворять требованиям полного покрытия частотной плоскости и равномерного покрытия апертурной плоскости.

Данная работа подготовила теоретическую базу для проведения исследований по определению атмосферных фазовых искажений с помощью многолучевого интерферометра.

Библиографический список

1. Fizeau M. H. Recherches sur les modifications que subit la vitesse de la lumiere dans le verre et plusieurs autres corps solides sous l'influence de la chaleur / M. H. Fizeau // Annales de chimie et de physique. – 1862. – 66. – P. 429–482.
2. Michelson A. A. Measurement of the diameter of Alpha Orionis with interferometer / A. A. Michelson, F. G. Piese // Astrophysical J. – 1921. – 53. – P. 249–259.
3. Корниенко Ю. В. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, В. Н. Уваров // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1987. – № 4. – С. 60–63.
4. Roddier F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays / F. Roddier // J. of the Optical Society of America. – 1987. – 4, iss. 8. – P. 1396–1401.
5. Корниенко Ю. В. Интерферометрический подход к проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко // Кинематика и физика небесных тел. – 1994. – 2, № 10. – С. 98–106.
6. Корниенко Ю. В. Информационная эффективность многолучевого интерферометра при наблюдении объекта сквозь неоднородную среду / Ю. В. Корниенко, В. А. Лейферов, В. В. Пугач // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 1997. – 2, № 2. – С. 132–136.
7. Корниенко Ю. В. Устойчивость интерферометрического метода формирования изображений к фазовым искажениям волнового фронта / Ю. В. Корниенко // Доп. НАН України. – 2000. – № 5. – С. 78–82.
8. Пугач В. В. Интерферометрический метод формирования изображений: обзор результатов и моделирование / В. В. Пугач // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т

- радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2004. – 9, спец. вып. – С. 140–153.
9. Корниенко Ю. В. Проблема видения сквозь турбулентную атмосферу и интерферометрический метод формирования изображений / Ю. В. Корниенко, В. В. Пугач // Успехи современной радиоэлектрон. – 2004. – № 1. – С. 52–57.
 10. Корниенко Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Кинематика и физика небесных тел. – 2011. – 27, № 6. – С. 52–63.
 11. Канев Ф. Ю. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования / Ф. Ю. Канев, В. П. Лукин. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы Сиб. отд. РАН, 2005. – 250 с.
 12. Корниенко Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении объекта с помощью телескопа с составной апертурой / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // Доп. АН України. – 2011. – № 10. – С. 73–79.

Рукопись поступила 24.12.2013.

Y. Kornienko, V. Pugach, S. Skuratovskyi

ON THE POSSIBILITY OF THE ATMOSPHERE CONDITION DIAGNOSTIC WITH THE MULTIBEAM INTERFEROMETER

The influence of the atmosphere on the results of astronomical observations from the Earth's surface dramatically decreases the resolution of obtained images. Many methods of fight against it require the information on atmospheric distortions. Obtaining of such information in practical case is usually carried out by using special wave-front detectors that operate on the basis of the natural or laser reference star. But there is the method that allows obtaining information on phase distortions in the atmosphere directly during the process of the observation of any object with the multibeam interferometer. Averaged over subapertures phases are the side result of image forming with such instrument. By their interpolation the phase distortions distribution over the aperture may be recovered. It was shown that the reconstruction

accuracy is acceptable while atmospheric inhomogeneities exceed the distance between subapertures. The dependences of reconstruction accuracy on peculiar inhomogeneities size and mean square deviation of phase distortions are presented. The research results may be useful for atmospheric researches, as well as for fight against its influence, for example, first order adaptive correction.

Key words: astronomic observations, phase distortions, multibeam interferometer, atmosphere conditions diagnostic, adaptive optics.

Ю. В. Корнієнко, В. В. Пугач, С. І. Скуратовський

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ АТМОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

Вплив атмосфери на результати астрономічних спостережень з поверхні Землі суттєво знижує розрізнення отриманих зображень. Багато методів боротьби з ним потребують інформації про атмосферні спотворення. Отримання такої інформації на практиці виконується за допомогою спеціальних датчиків хвильового фронту, що працюють по опорній зірці, природній чи лазерній. Однак існує спосіб отримувати інформацію про фазові спотворення в атмосфері безпосередньо під час спостереження довільного об'єкта багатопробним інтерферометром. Усереднені за субапертурами фази є побічним продуктом побудови зображення таким інструментом. За допомогою інтерполяції по них можливо відновити розподіл фазових спотворень за апертурою. Показано, що точність реконструкції є задовільною, коли атмосферні неоднорідності більші за відстань між субапертурами. Наведено залежності точності реконструкції від характерного розміру неоднорідностей та середньоквадратичного відхилення фазових спотворень. Результати досліджень можуть бути корисними як при дослідженнях атмосфери, так і в боротьбі з її впливом, наприклад при проведенні адаптивної корекції першого порядку.

Ключові слова: астрономічні спостереження, фазові спотворення, багатопробневий інтерферометр, діагностика стану атмосфери, адаптивна оптика.