

Применение метода накопления полных фаз при интерферометрическом способе формирования астрономических изображений

С. И. Скуратовский, В. В. Пугач, И. Ляшенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
Украина, Харьков, ул. Академика Прокура, 12, vlap@ukr.net*

*Метод накопления полных фаз в совокупности с методом Лабейри позволяет преодолеть искажающее влияние атмосферы на изображения, полученные телескопом с поверхности Земли. Однако его эффективность снижается с увеличением среднеквадратичного отклонения фазовых искажений и уменьшением относительного размера атмосферных неоднородностей в сравнении с диаметром апертуры телескопа. Это объясняется пространственным накоплением сигнала, присущим традиционному телескопу. Такого недостатка лишён многолучевой интерферометр с безизбыточной конфигурацией выходной апертуры. Для упрощения такой интерферометр моделируется как совокупность интерферометров Майкельсона, включающая все возможные пары субапертур. Детально описаны особенности накопления полных фаз при проведении наблюдений с помощью подобного инструмента, а также последующей реконструкции изображения. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие выводы теории.
Ключевые слова: фазовые искажения, наблюдение сквозь атмосферу, накопление полных фаз, многолучевой интерферометр, реконструкция изображения.*

Application of the method of accumulation of complete phases in the interferometric method of forming astronomical images

S. I. Skoratovsky, V. V. Pugach, I. Lyashenko

*Institute of Radio Physics and Electronics I.A. Master of National Academy of Sciences of
Ukraine
Ukraine, Kharkov, ul. Academician Proskury, 12, vlap@ukr.net*

*The total phase accumulation method in combination with Labeyrie method provides overcoming the distorting influence of the atmosphere on images, obtained by a telescope from Earth surface. But its effectiveness is being decreased with increasing the mean square deviation of phase distortions and decreasing the relative size of atmosphere inhomogeneities comparing to the diameter of the telescope aperture. It is related to the spatial signal accumulation, which is a property of traditional telescope. A multibeam interferometer with a non-redundant configuration of the output aperture has no such peculiarity. For simplification such interferometer is modeled as a set of Michelson interferometers, which includes all possible pairs of subapertures. The specific of total phase accumulation while observing with such instrument and the reconstruction of the image in this case are discussed in detail. The results of computer modeling approving theoretical concept are provided.
Keywords: phase distortions, observation through the atmosphere, total phase accumulation, multibeam interferometer, image reconstruction.*

1. Введение

Не смотря на развитие космических средств наблюдения, некоторые из которых были описаны в [1], основным источником астрономических данных на сегодняшний день всё ещё остаются наземные обсерватории. Это в полной мере относится к изображениям, особенно получаемым в оптическом диапазоне. Однако разрешение таких изображений оказывается существенно ниже дифракционного предела наблюдательного инструмента вследствие влияния случайных неоднородностей показателя преломления. Для преодоления влияния атмосферы все крупные телескопы

оснащаются системой адаптивной компенсации как минимум первого порядка (обеспечивает компенсацию наклона фронта волны) [2]. Часто её дополняет система формирования искусственной опорной звезды, совершенно необходимая при наблюдениях в оптическом диапазоне из-за малого количества естественных опорных источников. Таким образом, наблюдательный инструмент становится гораздо более сложным и дорогостоящим. Потому разработка методов обработки изображений, позволяющих избавиться от влияния атмосферных искажений, сохраняет свою актуальность.

Одним из таких методов является разработанный в ИРЭ НАНУ метод накопления полных фаз. Он дополняет метод Лабейри [3], который путём накопления позволяет довольно точно восстановить модули фурье-компонент изображения. В [4], однако, было показано, что данный метод имеет принципиальные ограничения, связанные со способом формирования изображения традиционным телескопом [5]. Позднее была высказана идея о возможности совмещения метода накопления полных фаз с многолучевым интерферометром. Теоретическое её обоснование можно найти в [6]. Тогда же был проведен первичный компьютерный эксперимент, который, однако, в силу отсутствия полноценной модели интерферометра был весьма приблизительным. Также ограничение модели проявилось в низком разрешении обрабатываемых изображений – общий размер 64x64, а размер наблюдаемого объекта 8x8.

Таким образом, была показана лишь принципиальная возможность совмещения метода накопления полных фаз и интерферометрического способа формирования изображений, о чём прямо говорится в [6]. В данной работе более подробно рассмотрены особенности комбинирования двух методов, а также произведено более точное моделирование и анализ полученных результатов. Раздел 2 содержит краткое описание многолучевого интерферометра. Его использование совместно с методом накопления полных фаз рассмотрено в разделе 3. Детали компьютерного эксперимента и его результаты обсуждаются в разделе 4.

2. Многолучевой интерферометр

В [5] подробно рассмотрены причины, ограничивающие эффективность метода накопления полных фаз при проведении наблюдений с помощью традиционного телескопа. Причём причины эти связаны не с недостатками метода, но обусловлены особенностями формирования изображений данным инструментом. Так, если набег фазы между частями апертуры превышает 2π , нарушается интерференция световых потоков, передаваемых ими. Фактически это означает, что изображения объекта, формируемые отдельными частями апертуры (размер которых определяется характерным размером атмосферных неоднородностей l). Это приводит к невозможности измерения фазы фурье-компонент, затронутых данным эффектом. В случае традиционного телескопа это относится ко всем фурье-компонентам.

Избавиться от такого катастрофического разрушения информации можно, либо устранив пространственное накопление сигнала, либо взяв его под контроль. Первая возможность связана с использованием правильно построенных безыбыточных конфигураций апертуры телескопа. Такая возможность была впервые описана Родье в [7]. В то время подразумевалось использование масок, накладываемых на апертуру традиционного телескопа, в настоящее же время подобный метод скорее относится к многозеркальным телескопам. На этом пути, однако, существует два препятствия. С одной стороны, при маскировании апертуры игнорируется часть светового потока, что приводит к ограничениям при наблюдении слабых объектов. С другой стороны, ни одна безыбыточная конфигурация не обеспечивает полное покрытие соответствующей части частотной плоскости [8]. Следовательно, некоторые частоты не будут переданы

вовсе, и изображение объекта даже при отсутствии каких-либо посторонних искажений уже будет существенно искажено наблюдательным инструментом.

Вторая возможность представляется гораздо более сложной. Необходимо сконструировать инструмент таким образом, чтобы избежать пространственного накопления сигнала. Для телескопа со сплошной апертурой сделать это не представляется возможным, поэтому вернёмся к идее инструмента с составной апертурой. На него накладываются следующие ограничения:

1. Отношение диаметра субапертуры d к характерному размеру атмосферных неоднородностей l должно быть меньше 1, иначе эффект пространственного усреднения будет наблюдаться уже в рамках одной субапертуры. Более подробное рассмотрение этого условия можно найти в [6].
2. Частотные окна, передаваемые различными парами субапертур, не должны пересекаться. Это накладывает условие не только на саму конфигурацию апертуры (которая, очевидно, для этого должна быть безызбыточной), но и на расстояние между субапертурами.
3. Конфигурация апертуры должна обеспечивать полное покрытие передаваемой области пространственных частот.

Как уже говорилось выше, выполнение пунктов 2 и 3 невозможно обеспечить в рамках одной конфигурации апертуры: избыточная конфигурация обеспечивает полное покрытие частотной области, но будет передавать частоты более чем однократно; безызбыточная же конфигурация обеспечивает однократную передачу, но не полное покрытие.

Выход из этой ситуации как раз и предлагает многолучевой интерферометр [9]. Он имеет две апертуры: входную и выходную. Обе апертуры содержат одинаковое количество субапертур. Перископическое смещение обеспечивает передачу светового потока от субапертур входной апертуры к субапертурам выходной. При этом конфигурация входной апертуры является избыточной, но обеспечивает полную передачу своего частотного окна. В то же время конфигурация выходной апертуры является безызбыточной, т.е. в передаваемом ею частотном окне будет обеспечена не более чем однократная передача всех пространственных частот.

Другой важной особенностью является то, что интерферометр позволяет получить не изображение исследуемого объекта, а так называемую интерферограмму. Её формирует выходная апертура инструмента, в то время как изображение может быть получено лишь с помощью входной апертуры. Таким образом, чтобы получить изображение объекта из результатов наблюдений с помощью интерферометра, необходимо провести процедуру реконструкции. Она включает в себя решение системы простых уравнений, как было описано в [10]. Решение такой системы, однако, осложняется большим количеством уравнений. Кроме того, как было упомянуто в [6], даже в этом случае приходится столкнуться с проблемой неоднозначности главного значения фазы фурье-компонент. Таким образом, и в этом случае накопление полных фаз может оказаться весьма полезным.

3. Особенности реконструкции изображения

При реконструкции изображения с использованием метода накопления полных фаз модули и фазы фурье-компонент рассматриваются отдельно. Накопление модулей фурье-компонент было описано Лабейри в [3]. Однако модули фурье-компонент, в отличие от полных фаз, доступны к непосредственному измерению по результатам эксперимента. К тому же, область определения модулей лежит на прямой, что делает их накопление эффективным вне зависимости от конфигурации апертуры инструмента. Таким образом, если построение интерферограммы не требуется, накопление модулей

фурье-компонент можно производить непосредственно в частотной плоскости входной апертуры. Сразу отметим, что физически полностью разделить накопление модулей и фаз фурье-компонент невозможно, поскольку регистрируются они одновременно. Однако с точки зрения моделирования накопление модулей в частотной плоскости входной апертуры идентично накоплению модулей в частотной плоскости выходной апертуры с последующим усреднением при реконструкции изображения. Поэтому подобное упрощение допустимо.

Накопление полных фаз представляет собой более сложный процесс, который включает в себя отслеживание изменения фазы во времени [11]. Чтобы избежать пространственного накопления главных значений фазы до отслеживания, такое накопление в обязательном порядке должно проводиться в частотной плоскости выходной апертуры. С точки зрения моделирования здесь имеется две возможности:

1. Моделирование переноса светового потока от субапертур входной конфигурации к субапертурам выходной. Это самый полный и «честный», но вместе с тем и самый сложный в реализации способ моделирования.
2. Моделирование переноса частотных окон каждой пары субапертур входной апертуры в частотные окна пар субапертур выходной апертуры. Такой способ гораздо проще, однако он требует аккуратности в обращении с модулями фурье-компонент.
3. Входную апертуру многолучевого интерферометра можно рассматривать как набор двухлучевых интерферометров Физо-Майкельсона [12]. С точки зрения реконструированных изображений этот способ аналогичен предыдущему. Однако теперь частотные окна, передаваемые парами субапертур входной апертуры, рассматриваются индивидуально. Собственно, выходная конфигурация при таком способе моделирования даже не фигурирует, а, значит, нет возможности получить интерферограмму.

Легко догадаться, что третий способ совместно с накоплением модулей фурье-компонент в частотной плоскости входной апертуры представляет собой самый простой способ моделирования реконструкции изображений при наблюдении с помощью многолучевого интерферометра. Он был использован в первичном эксперименте, описанном в [6]. В рамках данной работы мы будем использовать более полноценный второй способ.

Таким образом, мы получаем фазы фурье-компонент в частотной плоскости выходной субапертуры. Изображение же должно быть получено в фокальной плоскости входной апертуры. Необходимо осуществить обратное перемещение частотных окон. Поскольку входная апертура является избыточной, некоторые частотные окна будут переданы более чем однократно. Однако теперь мы уже имеем дело с полными фазами, поэтому для их совместного учета используется обычное усреднение. Модули же фурье-компонент были накоплены непосредственно в частотной плоскости выходной апертуры (см. выше). Объединив их и переведя результат в фокальную плоскость, мы получаем реконструированное изображение наблюдаемого объекта.

4. Компьютерный эксперимент и его результаты

Входными данными для компьютерного моделирования являются истинное изображение объекта, конфигурация входной и выходной апертуры интерферометра, а также параметры атмосферных фазовых искажений, такие как среднеквадратичное отклонение δ , параметр ширины спектральной плотности α , ширина ядра временного сглаживания M и количество сглаживаний m . Также задаётся длина

последовательности N . Более полное описание процесса моделирования и его особенностей можно найти в [13], здесь же мы рассмотрим его очень кратко.

На каждом шаге генерируется поле фазовых искажений с заданными свойствами. Генерация производится таким образом, чтобы обеспечить требуемую корреляцию между кадрами во времени. Далее получается фурье-образ изображения объекта в данном кадре с помощью входной апертуры интерферометра. Само изображение получать нет необходимости, необходимы только модули фурье-компонент для накопления.

Следующим шагом является построение изображения, получаемого каждой парой субапертур входной апертуры. Передаваемые этой парой частотные окна переносятся в соответствующие частотные окна выходной апертуры. Если есть необходимость сформировать интерферограмму, данную процедуру нужно производить для фурье-компонент «целиком», после чего от результата берётся преобразование Фурье. В данной работе в частотной плоскости выходной апертуры требовалось производить накопление фаз, поэтому переносу подвергаются только фазы фурье-компонент.

Таким образом, модули и фазы фурье-компонент накапливаются отдельно. После завершения накопления, как было описано выше, осуществляется обратный перенос фаз фурье-компонент, их усреднение в частотной плоскости входной апертуры и объединение с модулями. В результате получается фурье-образ реконструированного изображения.

Конфигурации входной и выходной апертуры, использованные при моделировании в данной работе, приведены на рис. 1, а и рис. 1, в соответственно. Они содержат по 15 субапертур, разнесенных на расстояние, необходимое для отсутствия взаимного перекрытия частотных окон. Входная конфигурация является избыточной, и рис. 1, б иллюстрирует кратность покрытия её частотной плоскости. Цветовая шкала приведена рядом. Видно, что область передаваемых частот покрыта полностью. В частотной плоскости выходной конфигурации (рис. 1, г) имеются непокрытые области, однако все остальные частоты, за исключением окрестностей нулевой частоты, передаются однократно.

В качестве наблюдаемого объекта в данной работе использовалось упрощенное изображение спутника (рис. 2, а). Такое изображение (будем называть его истинным) невозможно увидеть в телескоп или интерферометр из-за ограниченной области передаваемых частот. Изображение, получаемое при отсутствии атмосферных фазовых искажений, в любом случае будет содержать артефакты, связанные с этим ограничением. Восстановить непередаваемые частоты не удастся, можно лишь использовать апертурное ядро для восстановления изображения винеровским фильтром. Для рассматриваемого в данной работе интерферометра такое восстановленное изображение показано на рис. 2, б. Поскольку оно представляет собой предел качества реконструкции изображения, будем называть его эталонным и использовать для определения среднеквадратичной погрешности.

Накопление фаз фурье-компонент производилось согласно описанному выше алгоритму. Рис. 3 демонстрирует его результаты. Среднеквадратичное отклонение фазовых искажений во всех случаях было равно π , в то время как параметр α , характеризующий размер неоднородностей, изменялся от 0.01 до 0.05 с шагом 0.01. Это изменение прекрасно видно на картах фазовых искажений (Рис. 3, а). Рядом (Рис. 3, б) показаны фазовые искажения на входной апертуре интерферометра (атмосферно-апертурная функция). Изображения, полученные без применения накопления фаз (Рис. 3, в), искажены до неузнаваемости во всех случаях. Это не удивительно, т.к. при отсутствии накопления фаз их усреднение при обратном переносе частотных окон (из частотной плоскости выходной апертуры в частотную плоскость входной) полностью

воспроизводит пространственное накопление, которое имеет место в многозеркальном телескопе с конфигурацией апертуры, аналогичной конфигурации входной апертуры интерферометра.

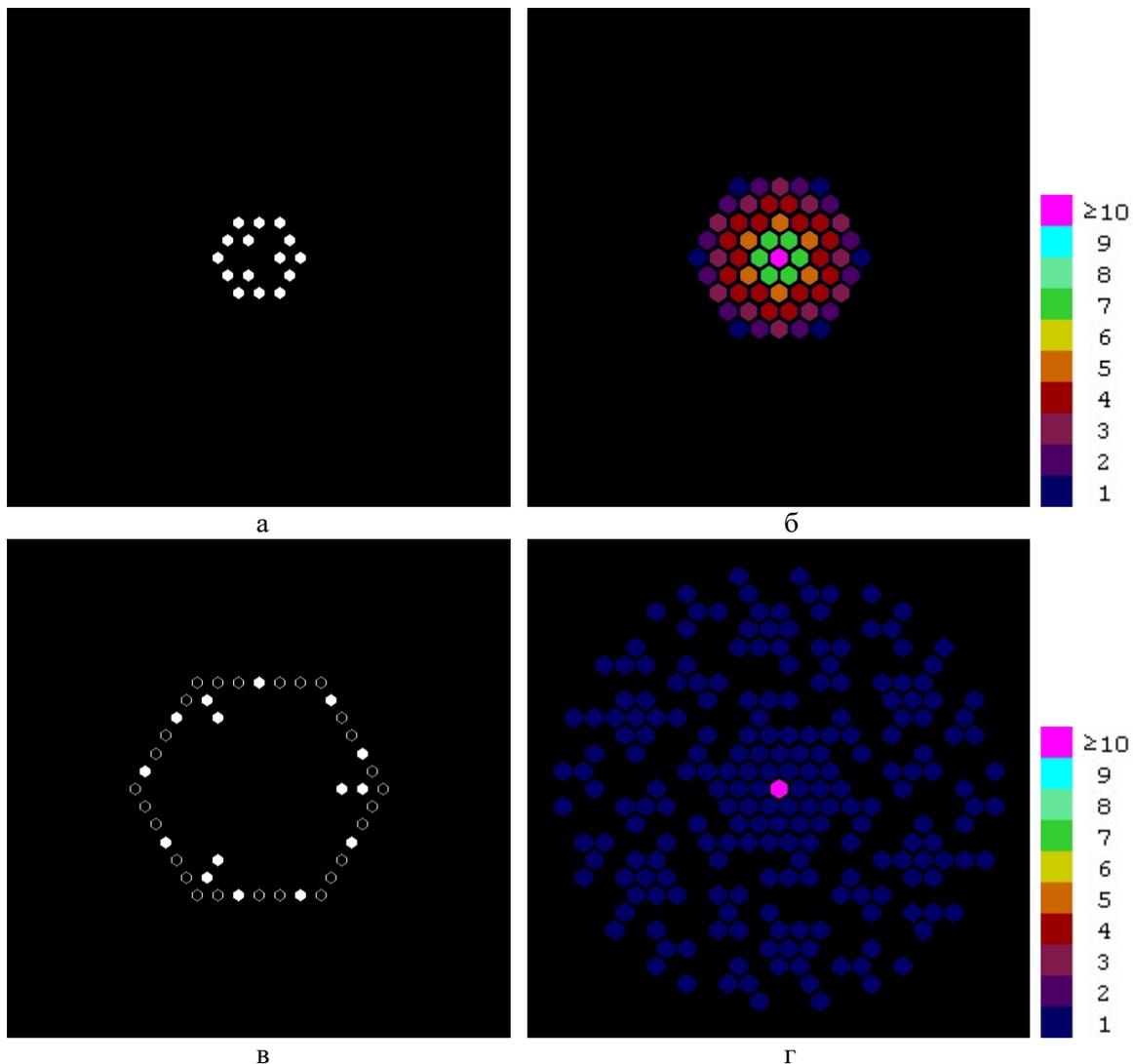


Рис. 1. Схемы расположения субапертур (а, в) и карты частотного покрытия с цветовым представлением кратности передачи (б, г) для входной (а, б) и выходной (в, г) апертуры.

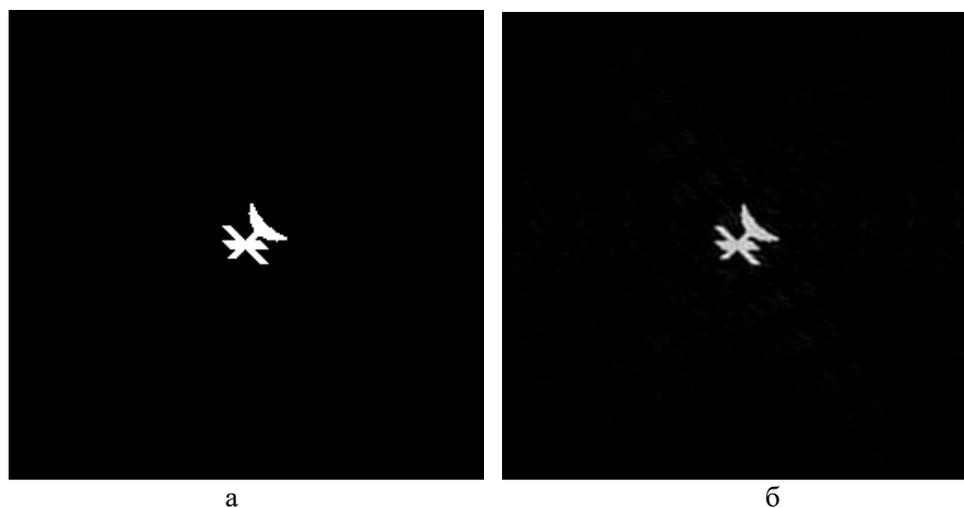


Рис. 2. Истинное (а) и эталонное (б) изображение наблюдаемого объекта.

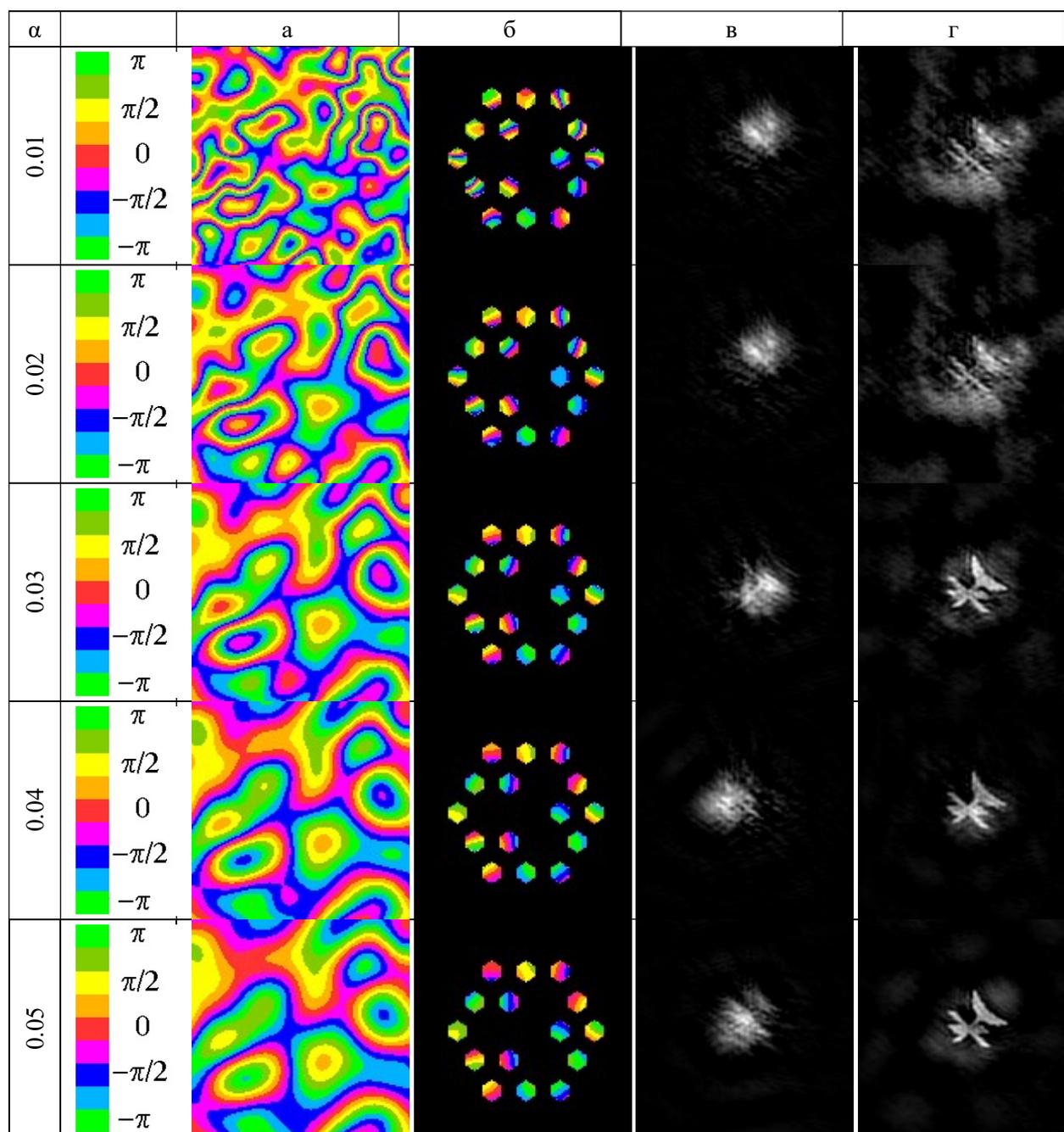


Рис. 3. Результат компьютерного моделирования работы многолучевого интерферометра: карта атмосферных фазовых искажений (а), атмосферно-апертурная функция для входной апертуры (б), реконструированное изображение при отсутствии накопления фаз по единственному наблюдению (в), реконструированное изображение с применением метода накопления фаз по последовательности из 500 ($\alpha = 0.01$) и 1000 изображений.

При тех же условиях изображения, полученные с применением накопления полных фаз в частотной плоскости выходной апертуры (Рис. 3, г), выглядят заметно лучше, особенно в случае, когда характерный размер неоднородностей существенно превышает размеры субапертур. При $\alpha = 0.01$ на рисунке показано накопление по 500 изображениям, во всех остальных случаях – по 1000. Выбор длины последовательности для накопления связан с наличием в зависимости

среднеквадратичной погрешности реконструкции от длины последовательности минимума. Для случаев традиционного и многозеркального орбитального телескопа вопрос о наличии такого минимума обсуждался, соответственно, в [13] и [14]. При использовании многолучевого интерферометра минимум в аналогичных зависимостях также имеет место (Рис. 4), хотя и менее выраженный. Предполагается, что причиной такого характера зависимостей являются сбои в отслеживании фазы, однако исследования по данному вопросу ещё не завершены.

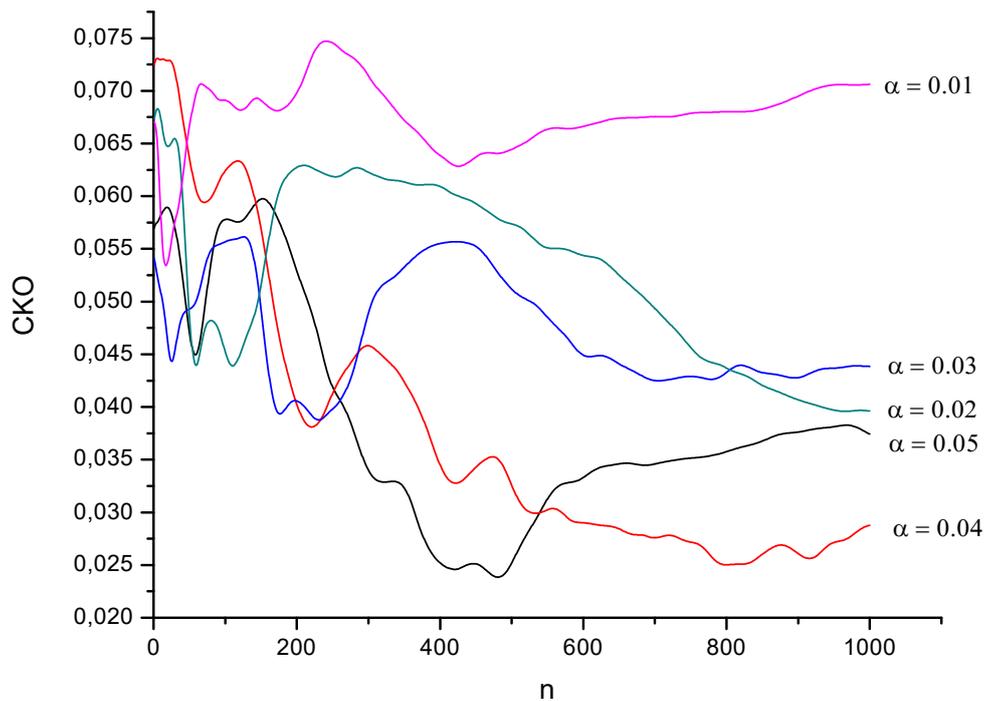


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной погрешности реконструкции от числа наблюдений, участвующих в накоплении при $\alpha = 0.01$ (A01), $\alpha = 0.02$ (A02), $\alpha = 0.03$ (A03), $\alpha = 0.04$ (A04) и $\alpha = 0.05$ (A05).

5. Выводы

Метод накопления полных фаз в сочетании с методом Лабейри позволяет эффективно реконструировать изображение наблюдаемого сквозь атмосферу объекта в случае, если характерный размер неоднородностей соизмерим с размером апертуры телескопа. Использование многолучевого интерферометра позволяет расширить область применения метода, поскольку в этом случае предел его применимости определяется соотношением характерного размера неоднородностей и размера субапертуры. В рамках данной работы реализована более полная компьютерная модель наблюдений с помощью многолучевого интерферометра. Подтверждена эффективность совместного использования метода накопления полных фаз и интерферометрического способа формирования изображений. В процессе исследования был выявлен немонотонный характер зависимости среднеквадратичной погрешности реконструкции от количества наблюдений, участвующих в накоплении. Ситуация аналогична случаю использования для наблюдений традиционного телескопа либо многозеркального космического телескопа, и нуждается в дальнейшем исследовании.

Литература

1. Ляшенко, И. Об эффективности метода накопления полных фаз при наблюдении объекта с помощью многозеркального орбитального телескопа / И. Ляшенко, Ю. В. Корниенко, В.В. Пугач, С.И. Скуратовский. // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2019. С. 645–654. ISSN 2304-0297.
2. Roggemann, M. C. Improving the resolution of ground-based telescopes / M. C. Roggemann, B. M. Welsh, R. Q. Fugate // *Reviews of modern physics*. – 1997. – № 69. – С. 437-505.
3. Labeyrie, A. Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images / A. Labeyrie // *Astronomy and astrophysics*. – 1970. – Vol. 6, No 1. – P. 85-87.
4. Корниенко, Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу II / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2012. – Т. 28, № 2. – С. 45-58.
5. Механизм разрушения информации при наблюдении сквозь неоднородную среду / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 39-48.
6. Корниенко, Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу II / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2013. – Т. 29, № 2. – С. 69-80.
7. Roddier, F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays / F. Roddier // *Journal of the optical society of America. Series A*. – 1987. – Vol. 4, No. 8. – P. 1396-1401.
8. Kopilovich, L. E. Multielement system design in astronomy and radio science / L. E. Kopilovich, L. G. Sodin // *Kluwer academic publishers*. – Netherlands, 2001. – 183 p.
9. Уваров, В. Н. О возможности получения изображений с диффракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную среду / В. Н. Уваров // *Доклады АН УССР. Сер. А*. – 1979. – № 10. – С. 839-841.
10. Kornienko, Yu. V. Interferometric method for image formation: the basic ideas and computer simulation / Yu. V. Kornienko, V. V. Pugach // *Kinematics and physics of celestial bodies. Supplement: Proceedings of the international conference “Astronomy in Ukraine – past, present and future”*. – 2005. – No. 5. – P. 534-536.
11. Корниенко, Ю. В. Накопление фаз фурье-компонент при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу / Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2011. – Т. 27, № 6. – С. 52-63.
12. 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. – Vol. 66. – P. 429-482
13. Корниенко, Ю. В. Об эффективности метода накопления полных фаз при наблюдении объекта сквозь земную атмосферу / Ю. В. Корниенко, И. Ляшенко, В. В. Пугач, С. И. Скуратовский // *Радиофизика и электроника*, 2020, в печати.
14. Корниенко, Ю. В. Накоплення фаз фур'є-компонентів при спостереженні об'єкта за допомогою орбітального інструменту // Ю. В. Корниенко, И. Ляшенко, В. В. Пугач, С. И. Скуратовский // *Кінематика і фізика небесних тіл*, 2020, Т. 36, №1, С. 68-84, ISSN 0233-7665.