

УДК 535.39:531.715.1

**Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский**

Институт радиоп физики и электроники им. А. Я. Усикова  
Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Проскуры 12, Харьков, 61085  
ss\_snake@ukr.net

**Накопление фаз фурье-компонентов при наблюдении  
объекта сквозь турбулентную атмосферу. III**

*Исследуется возможность преодоления границы эффективного применения методов накопления фаз фурье-компонентов. Предлагается использовать для наблюдения инструмент с составной апертурой. Показано, что при этом граница отодвинется во столько раз, во сколько размер субапертуры меньше характерного размера атмосферных неоднородностей. На компьютерной модели продемонстрированы результаты обработки методом накопления полных фаз последовательности интерферограмм, полученных с помощью многолучевого интерферометра.*

*НАКОПИЧЕННЯ ФАЗ ФУР'Є-КОМПОНЕНТІВ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ ОБ'ЄКТА КРИЗЬ ТУРБУЛЕНТНУ АТМОСФЕРУ. III, Корнієнко Ю. В., Скуратовський С. І. — Досліджено можливість подолання границі ефективного застосування методів накопичення фаз фур'є-компонентів. Пропонується застосовувати для спостереження інструмент із складеною апертурою. Показано, що при цьому границя відсувається у стільки разів, у скільки розмір субапертури менший за характерний розмір атмосферних неоднорідностей. На комп'ютерній моделі продемонстровано результати обробки методом накопичення повних фаз послідовності інтерферограм, отриманих за допомогою багатопроменевого інтерферометра.*

*ACCUMULATION OF FOURIER-COMPONENT PHASES WHILE OBSERVING AN OBJECT THROUGH A TURBULENT ATMOSPHERE. III, by Kornienko Yu. V., Skuratovskii S. I. — We study the possibility to overcome a limitation on the effective application of techniques of Fourier-component phase accumulation. An instrument with a composite aperture is proposed to be used for observations. It is shown that in this case the limitation increases as many*

*times as the subaperture's size is less than the typical size for atmosphere inhomogeneities. Some results of the application of the total phase accumulation technique for the processing of an interferogram sequence obtained with a multi-beam interferometer are demonstrated using a computer simulation.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В предыдущей работе [10] мы показали, что при наблюдении объекта с помощью традиционного телескопа метод накопления полных фаз, предложенный в работах [8, 9], имеет естественный предел возможностей, который проявляется при среднем квадратичном наклоне волнового фронта порядка  $h/l$ , где  $h$  — длина волны,  $l$  — характерный размер неоднородностей. В случае стационарного гауссова процесса с гауссовым спектром это происходит при среднем квадратичном значении фазовых искажений в атмосфере  $q = 2$ . При больших значениях  $q$  накопление фаз становится неэффективным и не может служить способом реконструкции изображения с дифракционным разрешением. Это относится ко всем известным способам накопления фаз, и имеет принципиальный характер, поскольку за этим пределом нарушается интерференция между световыми потоками, приходящими в фокальную плоскость телескопа от разных участков его апертуры. Таким образом, этот предел является свойством не способа накопления, а способа формирования изображения. Поэтому дальнейшее продвижение вперёд к достижению дифракционного предела разрешения телескопа путём накопления фаз должно быть направлено на одновременное усовершенствование способа формирования изображения. В данной работе показано, как можно воспользоваться уже известными идеями относительно формирования изображения для того, чтобы отодвинуть границу применимости метода накопления полных фаз.

## **НЕОБХОДИМОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА С СОСТАВНОЙ АПЕРТУРОЙ**

Как было сказано в работе [10], типичный наклон фазового фронта волны, обусловленный влиянием атмосферных неоднородностей, равен  $h/l$ , где  $h$  — среднее квадратичное отклонение фронта от невозмущённого положения, а  $l$  — характерный размер атмосферных неоднородностей. При размере апертуры телескопа  $D$ , заметно превышающем  $l$ , изображение точки в фокальной плоскости оказывается суммой пятен от каждого участка апертуры, соответствующего своей неоднородности. Каждое из этих пятен имеет характерный размер  $F/l$  и смещено относительно невозмущённого положения на величину  $Fh/l$ , где  $F$  — фокусное расстояние телескопа. При  $h > l$  смещение пятен становится больше их размера, и световые потоки перестают интерферировать, что исключает возможность измерения фаз фурье-компо-

нентов изображения, передаваемых соответствующими парами участков апертуры. Это является фактором, который ставит принципиальный предел достижению дифракционного предела разрешения, когда  $D/l > 1$ . Таким образом, при наблюдении с традиционным телескопом больших размеров и атмосферных искажениях фазы больше 2 получение дифракционного разрешения можно считать недостижимым.

По-видимому, единственный выход из этого положения состоит в применении для формирования изображения модифицированного телескопа с составной апертурой, состоящей из некоторого числа субапертур достаточно малого диаметра  $d$ . Такой телескоп должен функционировать как набор интерферометров Физо — Майкельсона, каждый из которых будет измерять функцию когерентности поля в своей области частотной плоскости, а эти области в совокупности будут покрывать всю область частот, подлежащую передаче телескопом. При этом, однако, интерференционные картинки от разных пар субапертур не должны перекрываться одновременно в фокальной и частотной области, иначе их не удастся разделить при последующей обработке. Это ставит специальные требования к оптической схеме телескопа.

На сегодняшний день известны две таких оптических схемы (каждая с различными вариациями). Первая представляет собой обычный телескоп с мозаичной апертурой, которой для выполнения сформулированного выше условия придаётся безызбыточная конфигурация [2, 4—6, 15, 16]. Поскольку такая апертура не может полностью покрыть область пространственных частот, передаваемую телескопом со сплошной апертурой [14], требуется несколько таких телескопов, совместно передающих эту область. Эта идея была предложена в работе [17] и усовершенствована в работе [13].

Другой, интерферометрический подход был предложен в работах [11, 18] и обстоятельно описан в работе [3]. Его суть состоит в том, что световые потоки от разных субапертур интерферируют не непосредственно, а после перископического смещения в поперечном направлении, изменяющего в фокальной плоскости пространственную частоту интерференционной картины. Это делается таким образом, чтобы пары субапертур, передающие одну и ту же область пространственных частот, давали в фокальной плоскости интерференционные картины в разных, не пересекающихся областях частотной плоскости. Это позволяет, выбирая конфигурацию входной апертуры такого интерферометра, не заботиться о её безызбыточности и оптимизировать её по другим показателям [12].

Разумеется, система, состоящая из достаточного числа интерферометров Физо — Майкельсона, тоже является возможным решением задачи, однако второй способ оказывается самым экономным, поскольку в нём каждый световой поток интерферирует с каждым другим световым потоком, чем достигается наиболее полное использование светового потока, приходящего от объекта. Одновременно при такой схеме получается выигрыш в требуемом числе субапертур, так как каждая субапертура участвует в передаче нескольких частотных окон.

Независимо от выбора оптической схемы результат одной мгновенной экспозиции представляет собой интерферограмму или совокупность интерферограмм, в фурье-образе которых представлены результаты измерения функции когерентности во всех окнах, передаваемых имеющейся системой субапертур. Если наблюдаемый объект достаточно мал, его фурье-образ в силу теоремы Котельникова — Найквиста однозначно определяется своими значениями в точках отсчёта, расположенными достаточно редко, и можно считать, что в каждом окне есть только один фурье-компонент. Обработка последовательности таких кадров должна состоять в усреднении полных фаз этих фурье-компонентов отдельно для каждой пары субапертур. Если какой-то фурье-компонент в спектре изображения объекта передаётся более чем одной парой субапертур, после этого требуется дополнительное усреднение фазы по всем парам субапертур, передающих данный фурье-компонент. При этом надлежит учитывать, что полная фаза определяется с неопределённостью в  $2k$ , и целые значения  $k$  для разных пар субапертур могут оказаться разными.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕСКОПА С СОСТАВНОЙ АПЕРТУРОЙ

Ранее речь шла об апертуре, диаметр  $D$  которой больше размера неоднородностей  $l$ . Теперь рассмотрим фазовое искажение ( — декартовы координаты в апертурной плоскости) в пределах субапертуры диаметром  $d$ , причём  $d \ll l$ . Пусть его среднее квадратичное значение равно  $q$ , а радиус корреляции равен  $l$ . В этом случае можно представить в виде ряда Тейлора

$$= 0 + \dots^2 + \dots \quad (1)$$

При достаточно малом  $d/l$  в этом разложении можно ограничиться линейным слагаемым. В этом приближении волновой фронт можно считать плоским и отличающимся от неискажённого фронта только смещением  $\phi_0$  и наклоном  $\alpha$ . Изображение точки, формируемое субапертурой, имеет диаметр  $F \approx d$ , а его смещение относительно невозмущённого положения, обусловленное наклоном фронта, равно  $Fq \approx 2l$ . Изображения, построенные разными субапертурами, будут эффективно интерферировать, если смещение пятна мало по сравнению с его диаметром, т. е. если

$$d \ll 2l/q. \quad (2)$$

Выполнение этого требования обеспечивает достижимость дифракционного предела разрешения при любом размере  $D$  всей апертуры телескопа. При этом критическое значение  $q$ , раньше равное  $2$ , теперь определяется условием равенства диаметра субапертурного дифракционного пятна и его типичного смещения, не зависит от размера полной апертуры и равно

$$q_0 = 2 \lambda/d. \quad (3)$$

Таким образом, применяя телескоп с составной апертурой, мы выигрываем в допустимых значениях  $q$  во столько раз, во сколько раз диаметр субапертуры меньше размера атмосферных неоднородностей. Конечно, уменьшение  $d$  приводит к проигрышу в других характеристиках телескопа, однако главным здесь представляется возможность преодолеть ограничение, которое для телескопа со сплошной апертурой имеет принципиальный характер и кажется непреодолимым.

Эта картина относится к случаю, когда атмосферное фазовое искажение является стационарным гауссовым процессом. Если статистика искажений ближе к колмогоровскому процессу, ситуация будет несколько хуже, так как в этом случае увеличение размера апертуры будет эквивалентно некоторому увеличению  $q$  (см. п. 2 в работе [9]) и потребует дальнейшего уменьшения  $d$ . Вопрос о статистических свойствах атмосферных фазовых искажений в должной степени не изучен; его следовало бы поставить на повестку дня, а от результатов этих исследований в определённой мере могли бы зависеть и предсказания теории.

Оптимистические выводы теории, изложенные здесь, требуют экспериментальной проверки, которая стоила бы слишком дорого. Однако компьютерный эксперимент при нынешних возможностях вполне доступен. Ему посвящён следующий раздел.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МНОГОЛУЧЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА С НАКОПЛЕНИЕМ ФАЗ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Компьютерный эксперимент во всех существенных подробностях ставился так же, как и в предыдущих работах [9, 10]. Однако теперь для получения изображения объекта вместо традиционного телескопа служил многолучевой интерферометр [3], позволяющий отделить друг от друга интерферограммы, формируемые каждой парой его субапертур. Входная апертура интерферометра имела конфигурацию, представленную на рис. 1. Хотя в таких конструкциях более естественной была бы гексагональная структура, как более близкая к традиционным круглым формам в астрономической оптике, мы выбрали прямоугольную, так как для неё алгоритмы обработки оказываются проще. Для экономии машинного времени изображения и их фурье-образы строились в растре всего 64 элементов, что позволяло получать изображения приемлемого качества, но уже требовало долгого счёта. Геометрия входной апертуры была выбрана с таким расчётом, чтобы каждая точка в спектре изображения была покрыта минимум однократно, но при этом в частотной плоскости интерферограммы окна, передаваемые разными парами субапертур, не перекрывались. Наблюдение состояло в съёмке последовательности из 1000 интерфе-

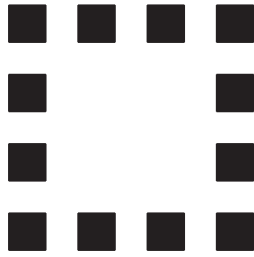


Рис. 1. Конфигурация входной апертуры интерферометра, используемая при исследовании возможностей метода накопления фаз

рограмм с интервалом времени в  $1/20$  времени замороженности атмосферы. Обработка этой последовательности, как и раньше, представляла собой отслеживание полных фаз всех фурье-компонентов и их усреднение по времени [10].

Усреднённые значения фазы использовались для реконструкции изображения объекта.

Особо подчеркнём, что накопление сигнала производилось исключительно путём усреднения полных фаз. Жёсткая связь между результатами измерения функции когерентности с помощью многолучевого интерферометра (см. ниже), лежащая в основе интерферометрического метода формирования изображений [7, 10], никак не использовалась при накоплении сигнала.

Главный вопрос, подлежавший выяснению с помощью этого эксперимента, состоял в том, возможно ли при наблюдении с помощью такого оптического инструмента преодолеть рубеж  $q = 2$ , используя метод накопления полных фаз, и при этом сохраняя дифракционное разрешение в реконструированном изображении.

Ответ на этот вопрос оказался положительным. Ниже более подробно излагаются полученные результаты.

В ходе эксперимента был сгенерирован ряд коррелированных временных последовательностей фазовых полей по 1000 кадров в серии. С этими полями фазовых искажений были построены интерферограммы объекта, моделирующие результаты наблюдений объекта с помощью описанного выше интерферометра сквозь турбулентную атмосферу. Последовательности этих интерферограмм подвергались преобразованию Фурье, и полные фазы их фурье-компонентов отслеживались и усреднялись, как это было описано в работе [10]. С полученными средними значениями фаз реконструировалось изображение объекта; при этом для сокращения принципиальных вычислений модули фурье-компонентов получались не из результатов наблюдения, а непосредственно из фурье-образа неискажённого изображения. Дополнительным оправданием этому может служить тот факт, что, как показано в работах [7, 11], для слабого объекта, когда интерферограммы состоят из отдельных фотонных событий, модули можно получить временным накоплением сигнала второго порядка (по парам фотонных событий), в то время как для получения фаз необходимо накопление третьего порядка (по тройкам событий), требующее при слабом сигнале намного большего времени. Поэтому точность определения модулей при слабом сигнале всегда будет превышать точность определения фаз.

Каждое фазовое поле представляло собой реализацию стационарного гауссова случайного процесса с гауссовым спектром. Параметр

рам этого процесса — среднему квадратичному значению искажения фазы  $q$  и размеру неоднородностей  $l$  — придавались различные значения, чтобы проверить работу метода при разных состояниях атмосферы. Параметру  $l$  придавались такие значения, чтобы диаметр апертуры в несколько раз превосходил размер неоднородностей; в большинстве экспериментов отношение  $D/l$  было равно 3 или 4. Параметру  $q$  придавались такие значения, при которых в случае сплошной апертуры метод перестаёт работать, и значения  $q$  увеличивались до тех пор, пока метод не переставал работать и с составной апертурой.

Картина, которая открылась в результате этих экспериментов, иллюстрируется изображениями, представленными на рис. 2. Они являются результатом реконструкции по 1000 кадров, полученных описанным выше способом при  $l = 10$  и  $q$  от до 4. Верхний ряд изображений (рис. 2, *a*) — это результат реконструкции по данным телескопа с круглой сплошной апертурой диаметром 30 элементов раstra, такой же, как и в работах [9, 10]. Средний ряд (рис. 2, *б*) получен путём накопления фаз по данным многолучевого интерферометра, входная апертура которого изображена на рис. 1. Значения  $q$ , при которых со сплошной апертурой удаётся получить изображения приемлемого качества, едва ли достигает . При такой атмосфере интерферометр даёт хорошее изображение. При дальнейшем увеличении  $q$  телескоп со сплошной апертурой постепенно перестаёт работать, в то время как при наблюдении с интерферометром качество изображения лишь не-

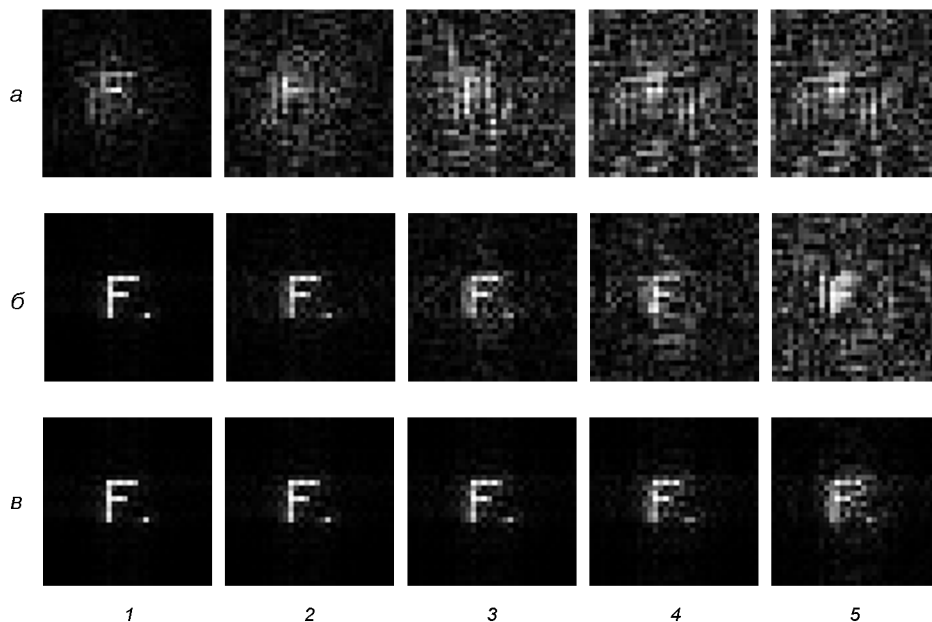


Рис. 2. Изображения, реконструированные методом накопления полных фаз при использовании телескопа со сплошной апертурой (*a*), многолучевого интерферометра (*б*) и многолучевого интерферометра с применением адаптивной коррекции наклона фазового фронта на субапертурах (*в*) при следующих характеристиках атмосферы:  $D/l = 3$ ,  $q =$  (1),  $3/2$  (2), 2 (3), 3 (4) и 4 (5)

сколько снижается. При  $q = 3$ , когда телескоп со сплошной апертурой не даёт и намёка на изображение, качество изображения, реконструированного по данным интерферометра, всё ещё приемлемо, хотя тоже начинает заметно снижаться. Здесь мы приближаемся к пределу, обусловленному наклоном волнового фронта, когда нарушается совмещение интерферирующих потоков. Это наводит на мысль, что предел можно отодвинуть, если снабдить интерферометр адаптивной системой, способной компенсировать наклон фронта на каждой субапертуре в отдельности. Такая система, точно компенсирующая наклон фронта, была смоделирована и включена в модель интерферометра. Полученный результат иллюстрируется нижним рядом изображений (рис. 2, в). Здесь можно видеть, что реконструкция изображения остаётся успешной даже при  $q = 4$ , хотя при этом качество полученного изображения заметно снижается. Снижение качества при точной адаптивной компенсации наклонов объясняется влиянием членов высших порядков в разложении (1).

Предельное значение  $q$ , до которого остаётся возможным успешно реконструировать изображение, теперь не является постоянным: оно увеличивается с уменьшением размера субапертуры по сравнению с размером неоднородностей. Уменьшение субапертур потребует увеличения их числа. Это повлечёт за собой целый ряд неудобств, однако всё же откроет путь к достижению дифракционного предела разрешения даже при плохой атмосфере.

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 приведены зависимости средней квадратичной погрешности реконструкции от  $q$ . Они соответствуют случаю  $D/l = 2$  (под средней квадратичной погрешностью понимается среднее квадратичное отклонение реконструированного изображения от истинного). Кривая 1 показывает, как изменяется погрешность при использовании телескопа со сплошной круговой апертурой. График заканчивается в точке  $q = 2$ , поскольку при дальнейшем увеличении среднего квадратичного отклонения фаз реконструированное изображение полностью утрачивает сходство с исходным. Кривая 2 относится к случаю использования многолучевого интерферометра с конфигурацией входной апертуры, показанной на рис. 1. Видно, что те же самые значения погрешности достигаются в этом случае практически при вдвое больших  $q$ . Ещё лучших результатов позволяет добиться использование адаптивной коррекции наклона фазового фронта (кривая 3). Однако к моменту достижения  $q = 4$  и в этом случае средняя квадратичная погрешность превышает значение 0.8, что обычно соответствует получению в результате реконструкции неприемлемо плохого изображения.

Здесь следует отметить, что средняя квадратичная погрешность, хотя и позволяет дать количественную оценку полученным результа-



Рис. 3. Зависимость средней квадратичной погрешности реконструкции изображения методом накопления полных фаз от  $q$  при использовании телескопа со сплошной апертурой (кривая 1), а также многолучевого интерферометра при отсутствии (кривая 2) и наличии (кривая 3) адаптивной коррекции наклона фазового фронта на субапертурах

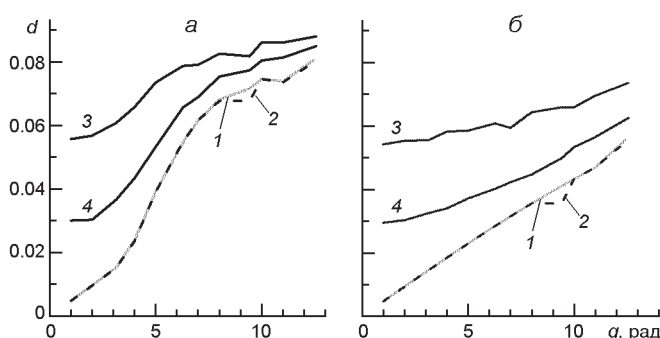
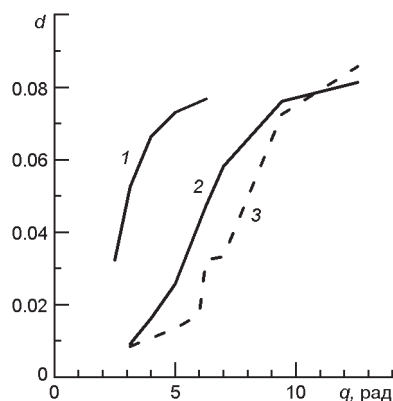


Рис. 4. Зависимость средней квадратичной погрешности реконструкции изображения от  $q$  при использовании многолучевого интерферометра в случае отсутствия шума (кривая 1), наличии аддитивного (кривая 2) и фотонного (кривые 3 и 4) шума: *а* — случай отсутствия адаптивной коррекции наклона фазового фронта на субапертурах, *б* — случай наличия такой коррекции

там, всё же не может в полной мере характеризовать возможность успешной интерпретации реконструированного изображения. Так, согласно графику на рис. 3 значения погрешности при  $q = 4$  для случаев отсутствия и наличия адаптивной коррекции наклона фазового фронта на каждой субапертуре практически одинаковы, однако во втором случае реконструированное изображение визуально гораздо больше напоминает исходное (рис. 2). Тем не менее, при использовании конкретного инструмента наблюдений и способа обработки их результатов средняя квадратичная погрешность позволяет оценить зависимость качества реконструкции от  $q$ , и в этом отношении является приемлемой характеристикой.

Таким образом, проведенное исследование на компьютерной модели подтверждает эффективность метода накопления фаз при использовании многолучевого интерферометра. Однако оно не было бы полным, если бы результаты были получены только для случая отсутствия шума. Для заполнения этого пробела потребовалась дополнительная серия экспериментов, результаты которых приведены на рис. 4. На рис. 4, *а* показаны графики для случая отсутствия адаптивной коррекции наклона фазового фронта, а на рис. 4, *б* — при её наличии. Кривая 1 показывает, как выглядели эти зависимости при от-

сутствии шума. Штриховая кривая 2 демонстрирует влияние аддитивного шума регистрации (ОСШ = 1000) на точность реконструкции. То, что эти две кривые практически совпадают, подтверждает вывод, сделанный в работе [10] для случая использования телескопа со сплошной апертурой.

Кривые 3 показывают, как ведёт себя погрешность при наличии в изображениях фотонного шума (нижняя кривая — 1000 фотонов на элемент, верхняя — 100 фотонов на элемент). Видно, что фотонный шум оказывает на точность восстановления гораздо большее воздействие, чем аддитивный шум. Однако и в этом случае реконструированные изображения остаются приемлемыми до значений  $q = 3$  при отсутствии адаптивной коррекции наклона фазового фронта на субапертурах и до  $q = 4$  при наличии такой коррекции.

### НАКОПЛЕНИЕ ФАЗ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Применение многолучевого интерферометра для наблюдения объекта может вызвать естественный вопрос: зачем нужно накопление фаз, если такой интерферометр способен сам обеспечить исключение фазовых искажений из результатов измерений благодаря их избыточности (с учётом теоремы ван Циттерта — Цернике [1]). Ответ на этот вопрос требует более детального его рассмотрения.

Как явствует из работ [3, 7, 11, 18], полный набор всех результатов однократного измерения фаз с помощью интерферометра содержит в себе достаточно информации для определения и исключения фазовых искажений на всех субапертурах интерферометра. Это обеспечивается тем, что измеряемые фазы  $i_k$  (фаза фурье-компонента, передаваемого  $i$ -й и  $k$ -й субапертурами) и результаты их измерений  $i_k$  связаны с атмосферными фазовыми искажениями  $i$  и  $k$  на соответствующих субапертурах уравнениями

$$i_k = i + k \quad (4)$$

При этом учитывается только нулевое слагаемое в (1). Можно написать и более совершенную систему уравнений, учитывающих наклон фронта, что существенно усложнит процедуру обработки интерферограммы.

Совокупность всех таких уравнений образует систему уравнений, которой при правильно выбранной конфигурации входной апертуры достаточно для определения всех  $i_k$  (с неопределённостью, соответствующей лишь перемещению объекта по небесной сфере). Решая эту систему, можно (с какой-то точностью) определить истинные значения всех фаз  $i_k$ . Это осуществимо даже при наличии единственного мгновенного снимка, когда никакое накопление по времени невозможно. С этой точки зрения интерферометрический метод представляется более совершенным, чем метод накопления полных фаз.

Однако эти рассуждения наталкиваются на уже знакомое препятствие: фазы  $\varphi_{ik}$  в (4), получаемые при обработке интерферограммы, представлены своими главными значениями и отличаются от полных значений на величину  $2\pi k$  ( $k$  — неизвестное целое число). Это обстоятельство не имело бы значения, если бы изменение на  $2\pi k$  правой части (4) приводило бы к такому же изменению в решении системы (4). Однако одна и та же величина  $\varphi_{ik}$  входит в разные уравнения системы (4) (в силу избыточности входной апертуры), и никакой гарантии инвариантности решения нет. Поэтому в правых частях системы (4) должны стоять полные значения измеренных фаз, что порождает проблему их определения и приводит к требованию их отслеживания.

Поэтому интерферометрический метод, будучи принципиально применимым к одиночному кадру, практически потребует последовательности кадров, причём пригодной для отслеживания фаз, т. е. полученной с интервалом времени, малым по сравнению с временем заморозки атмосферы.

Дальнейшее рассмотрение этого вопроса приводит к выводу, что наилучшим подходом к задаче было бы согласованное решение систем (4) для всех кадров последовательности. Это порождает трудности уже совсем другого характера. В эксперименте, описанном выше (см. рис. 1), апертура состояла из 12 субапертур, и система (4) содержала бы 66 уравнений (в предположении, что объект мал, и каждое окно в частотной плоскости содержит только одну независимую точку отсчёта, в противном случае число уравнений будет намного больше). Объединение таких систем для последовательности из 1000 кадров содержало бы 66000 уравнений. При всей принципиальной простоте этой системы практическое решение её создало бы значительные трудности.

Метод накопления полных фаз требует значительно меньшего объёма вычислений, осуществимых даже в процессе наблюдения, что может оказаться весьма важным при решении некоторых практических задач. Для телескопа со сплошной апертурой эта процедура подробно описана в работе [10]. Для многолучевого интерферометра она отличается в несущественных деталях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод накопления полных фаз открывает новые возможности получения астрономических изображений с дифракционным разрешением. Реализация этих возможностей будет более полной, если для формирования изображений использовать многозеркальный телескоп, предпочтительно с адаптивной компенсацией наклонов волнового фронта на каждом зеркале в отдельности. Этот метод может быть актуальным и при наблюдении из космоса, поскольку при больших размерах телескопа многие причины могут и там создать фазовые искажения, подобные атмосферным.

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973.—719 с.
2. Копилович Л. Е. Регулярный метод построения систем безызбыточных апертурных масок для наблюдения сквозь турбулентную атмосферу // Докл. АН УССР. Сер. А.—1983.—№ 10.—С. 55—58.
3. Корниенко Ю. В. Интерферометрический подход к проблеме видения сквозь турбулентную атмосферу. I // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 2.—С. 98—106.
4. Корниенко Ю. В. Интерферометрический метод формирования изображений и проблема оптимизации апертур интерферометра // Радиофизика и электроника.—2000.—5, № 1.—С. 186—190.
5. Корниенко Ю. В. Построение безызбыточных антенных конфигураций на квадратной решетке методом случайного поиска // Радиофизика и электроника.—2000.—5, № 3.—С. 148—154.
6. Корниенко Ю. В. Построение безызбыточных антенных конфигураций на гексагональной решетке методом случайного поиска // Радиофизика и электроника.—2002.—7, № 1.—С. 142—153.
7. Корниенко Ю. В. Проблема углового разрешения при наблюдении астрономических объектов сквозь атмосферу // 200 лет астрономии в Харьковском университете / Под ред. Ю. Г. Шкуратова. — Харьков: ХНУ, 2008.—С. 353—379.
8. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. О реконструкции неискажённого изображения объекта по серии его изображений, искажённых средой со случайными неоднородностями показателя преломления // Доповіді НАН України.—2010.—№ 2.—С. 83—89.
9. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонентов при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. I // Кинематика и физика небес. тел.—2011.—27, № 6.—С. 52—63.
10. Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И. Накопление фаз фурье-компонентов при наблюдении сквозь турбулентную атмосферу. II // Кинематика и физика небес. тел.—2012.—28, № 2.—С. 45—58.
11. Корниенко Ю. В., Уваров В. Н. Накопление сигнала при наблюдении астрономического объекта сквозь турбулентную атмосферу // Докл. АН УССР. Сер. А.—1987.—№ 4.—С. 60—63.
12. Развитие квазиоптических и оптических методов в радиофизических исследованиях: (Отчёт по НИР «ОПОРА») / Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины; Руководитель темы Ю. В. Корниенко. — № ГР 01.03U002263. — Харьков, 2006.—324 с.
13. Уваров В. Н. О возможности получения изображений с дифракционным разрешением при наблюдении сквозь неоднородную среду // Докл. АН УССР. Сер. А.—1979.—№ 10.—С. 839—841.
14. Kopylovich L. E. Construction of non-redundant masks over square grids using difference sets // Opt. Commun.—1988.—68, N 1.—P. 7—10.
15. Kopylovich L. E. Non-redundant apertures for optical interferometric systems: maximization of the number of elements // J. Mod. Opt.—1998.—45, N 11.—P. 2417—2424.
16. Kopylovich L. E., Sodin L. G. Multielement system design in astronomy and radio science. — Netherlands: Kluwer, 2001.—183 p.
17. Rhodes W. T., Goodman J. W. Interferometric technique for recording and restoring images by unknown aberration // J. Opt. Soc. Amer.—1973.—63, N 6.—P. 647—657.
18. Roddier F. Redundant versus nonredundant beam recombination in an aperture synthesis with coherent optical arrays // J. Opt. Soc. Amer.—1987.—A4, N 8.—P. 1396—1401.

Статья поступила в редакцию 08.09.11