

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 535.39:531.715.1

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

С. И. Скуратовский

*Институт радиопрофики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [sssnake@ire.kharkov.ua](mailto:sssnake@ire.kharkov.ua)

Исследована возможность восстановления комплексной функции по модулю ее фурье-образа. С помощью компьютерного эксперимента показано, что путем использования итерационной процедуры, аналогичной применявшейся ранее для реконструкции вещественных изображений, можно восстановить комплексную функцию с точностью до постоянного фазового множителя. Подтверждено, что в общем случае точное восстановление менее вероятно, чем при работе с вещественным объектом. Однако внесение оправданных с точки зрения практического использования дополнительных условий позволяет существенно повысить вероятность правильного восстановления. Ил. 3. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** видение сквозь турбулентную атмосферу, спекл-интерферометрия, определение параметров атмосферы.

При проведении практических наблюдений изображения объекта часто содержат искажения, внесенные неоднородностями показателя преломления среды. Такие проблемы можно встретить, например, в длинноволновой радиоастрономии (влияние оказывают неоднородности электронной плотности в ионосфере) или в гидролокации (мешающим фактором являются температурные неоднородности водной среды). Особенно актуальна эта проблема при наблюдении заатмосферного объекта в оптическом диапазоне. В этом случае искажения возникают из-за случайных неоднородностей показателя преломления, обусловленных флуктуациями температуры воздуха.

При обработке последовательности изображений, полученной в результате таких наблюдений, обычно ставят задачу получения изображения объекта с дифракционным разрешением телескопа. Решение задачи оптимальной статистической оценки истинного изображения [1–3] в простейшем случае приводит к винеровскому фильтру [4]. Однако, как показано в работах [4, 5], при реальных значениях отношения сигнал–шум (ОСШ) его применение приводит к завалу высших пространственных частот, в результате чего изображение оказывается много хуже дифракционного. Поэтому в течение многих лет предпринимались попытки поиска более эффективных способов обработки последовательности изображений [6–9]. В частности, Лабейри предложил накапливать сигнал путем суммирования не самих изображений, а квадратов модулей их фурье-образов [6]. Таким образом можно довольно точно восстановить автокорреляционную функцию объекта, но при этом полностью теряется информация о фазах фурье-компонент.

Ю. В. Корниенко в работе [7], а позднее J. R. Fienup [8] предложил использовать итерационный алгоритм для восстановления фазовой информации. Впоследствии эта возможность была исследована более подробно [10–12].

Таким образом, в вышеперечисленных работах ставилась задача по квадрату модуля фурье-образа изображения восстановить изображение при условии, что наблюдаемый объект пространственно ограничен [8]. Возникает вопрос: нельзя ли использовать аналогичный алгоритм для решения другой задачи – найти поле фазовых искажений по мгновенному изображению точечного объекта? Рассмотрению этой задачи и посвящена данная работа.

**1. Постановка задачи.** Как известно, для тонкого слоя атмосферы, расположенного непосредственно вблизи наблюдателя, его искажающее влияние сводится к возмущению фазы приходящей волны и не затрагивает ее интенсивности [13]. Пусть  $\varphi(\xi, \eta)$  – искажение фазы приходящей волны, обусловленное влиянием атмосферы, где  $\xi, \eta$  – декартовы координаты в апертурной плоскости телескопа. Тогда амплитуда волны, по которой телескоп формирует изображение, оказывается равной исходной амплитуде, умноженной на атмосферно-апертурную функцию

$$\tilde{A}(\xi, \eta) = a(\xi, \eta)e^{i\varphi(\xi, \eta)}, \quad (1)$$

где  $a(\xi, \eta)$  – апертурная функция телескопа, равная единице в пределах апертуры и нулю за ее пределами. Пространственно-частотная характеристика системы телескоп – атмосфера  $\tilde{W}(\xi, \eta)$  является автоверткой функции  $\tilde{A}(\xi, \eta)$ , а некогерентное изображение точечного источника  $J(x, y)$  –

квадратом модуля обратного преобразования Фурье функции  $\tilde{A}(\xi, \eta)$  [13].

Пусть в процессе наблюдения с помощью телескопа с известной  $a(\xi, \eta)$  измерена функция  $J(x, y)$ . Требуется восстановить по ней атмосферно-апертурную функцию  $\tilde{A}(\xi, \eta)$ .

Таким образом рассматриваемая задача математически полностью эквивалентна задаче восстановления изображения объекта конечных размеров по его энергетическому спектру [7, 8, 10–12] с той лишь разницей, что искомая функция  $\tilde{A}(\xi, \eta)$  теперь является комплексной.

Понятно, что найти функцию  $\tilde{A}(\xi, \eta)$  можно только с некоторым конечным пространственным разрешением. Пусть ее значения требуется найти в узлах квадратной решетки, состоящей из  $n \times n$  элементов. Если бы измерению поддавалась комплексная амплитуда поля в фокальной плоскости телескопа, это потребовало бы измерения амплитуды в  $n \times n$  точках с шагом в один дифракционный элемент разрешения данного телескопа. Однако реально мы имеем возможность измерять только интенсивность в каждой точке фокальной плоскости, и ее измерение дает нам вдвое меньше значений, чем нужно для однозначного определения функции  $\tilde{A}(\xi, \eta)$ . Если регистрировать кадр вдвое большего размера, мы получим  $2n \times 2n$  независимых измерений интенсивности, в результате чего система уравнений для искомым значений  $\tilde{A}(\xi, \eta)$  будет содержать вдвое больше уравнений, чем неизвестных, и, таким образом, окажется переопределенной. Именно это обстоятельство и открывает возможность эффективно определить  $\tilde{A}(\xi, \eta)$  по изображению точечного источника.

**2. Итерационный алгоритм восстановления.** Алгоритм реконструкции атмосферно-апертурной функции по некогерентному изображению точечного объекта аналогичен предложенному в работах [7, 8] и затем исследованному в работе [12]. Пусть задан массив  $W$ , состоящий из  $2n \times 2n$  вещественных чисел и представляющий зарегистрированное при наблюдении некогерентное изображение точечного источника, расположенного в начале координат. Пусть также задан массив  $a_0$ , состоящий из  $n \times n$  комплексных чисел и служащий начальным приближением искомой атмосферно-апертурной функции  $\tilde{A}(\xi, \eta)$ . Вычисления производятся в рабочем массиве  $A$  форматом  $2n \times 2n$  комплексных чисел, в левую верхнюю четверть которого до начала итерационного процесса заносится начальное приближение  $a_0$ . Остальные элементы массива

$A$  устанавливаются в ноль. Затем начинается итерационный процесс, на каждом шаге которого выполняются следующие действия. Вначале производится частотная коррекция: вычисляется преобразование Фурье массива  $A$ , после чего модули всех фурье-компонент устанавливаются равными заданным в массиве  $W$ . При этом фазы фурье-компонент оставляются без изменений. Далее выполняется пространственная коррекция: вычисляется обратное преобразование Фурье рабочего массива  $A$  и производится обращение в ноль всех элементов массива, кроме левой верхней четверти. В результате мы получаем новое приближение  $A_i$ .

На каждом шаге итерационного процесса вычисляется спектральная погрешность

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{4n^2} \sum_{j=1}^{2n} \sum_{k=1}^{2n} (W_{ijk} - W_{jk})^2}, \quad (2)$$

где  $W_i$  – пространственно-частотная характеристика системы телескоп – атмосфера, вычисленная по новому приближению  $A_i$ ;  $j, k$  – индексы элемента соответствующего массива. Кроме того, определяется среднеквадратичная разность между соседними приближениями  $A_i$  и  $A_{i-1}$

$$v_i = \sqrt{\frac{1}{4n^2} \sum_{j=1}^{2n} \sum_{k=1}^{2n} (A_{ijk} - A_{(i-1)jk})^2}. \quad (3)$$

Процесс заканчивается, когда  $\delta_i$  становится меньше заданного порогового значения, либо  $v_i$  обращается в ноль.

**3. Сходимость процесса.** В работе [7] для случая восстановления изображения вещественного объекта было показано, что процесс сходится к правильному решению при достаточно малом различии между начальным приближением и истинным изображением. Этот вывод основан на следующих соображениях. Пусть  $S$  – линейное ( $4n^2$ -мерное) пространство изображений, которые могут быть представлены массивом  $A$ , а  $P$  – его подпространство изображений, которые могут быть представлены левой верхней четвертью массива  $A$ . Евклидова норма погрешности текущего приближения уменьшается в результате как первого, так и второго действия на каждом шаге итерационного процесса, поскольку второе действие является умножением погрешности на линейный оператор проектирования вектора из пространства  $S$  на подпространство  $P$ . В результате такого проектирования норма погрешности умножается на  $\alpha < 1$ . При естественном предположении о единственности решения задачи в некоторой окрестности истинного изображения это приводит к выводу, что норма погрешности в

этом итерационном процессе убывает приблизительно по закону геометрической прогрессии. Эти соображения применимы и к случаю восстановления комплексной функции. Если начальное приближение  $A_0$  достаточно мало отличается от истинной функции  $A$ , процесс сходится к правильному решению.

Это подтверждается с помощью компьютерного эксперимента. Поскольку на этапе проверки работоспособности алгоритма в выборе объекта для восстановления мы не ограничены, то для сохранения преемственности с работой [12] в качестве объекта было выбрано изображение латинской буквы  $F$ , изображенной в растре  $8 \times 8$  точек (рис. 1, б). На изображении вещественной части объекта (вверху) точки символа  $F$  имеют интенсивность 1, а фоновые точки – 0. На изображении мнимой части (внизу), наоборот, точки символа имеют нулевую интенсивность, а фоновые точки

– единичную. Для представления изображений на этом рисунке применялась равномерная полутоновая шкала, в которой белый цвет соответствует интенсивности 1, а черный –1 (за исключением изображений начальных приближений – там белый цвет соответствует интенсивности 2, а черный –2).

На рис. 1, а показано начальное приближение, представляющее собой истинную функцию, к которой добавлен нормальный белый шум с ОСШ = 1. Видно, что объект практически неразличим на фоне шума, но, тем не менее, с вероятностью около 10 %, удается восстановить искомую функцию по модулю ее фурье-образа с достижением спектральной погрешности  $\delta$  порядка  $10^{-8}$ . Случай такой удачной реконструкции приведен на рис. 1, б (при такой точности восстановленный объект визуально ничем не отличается от истинного, поэтому истинный объект приведен не был).

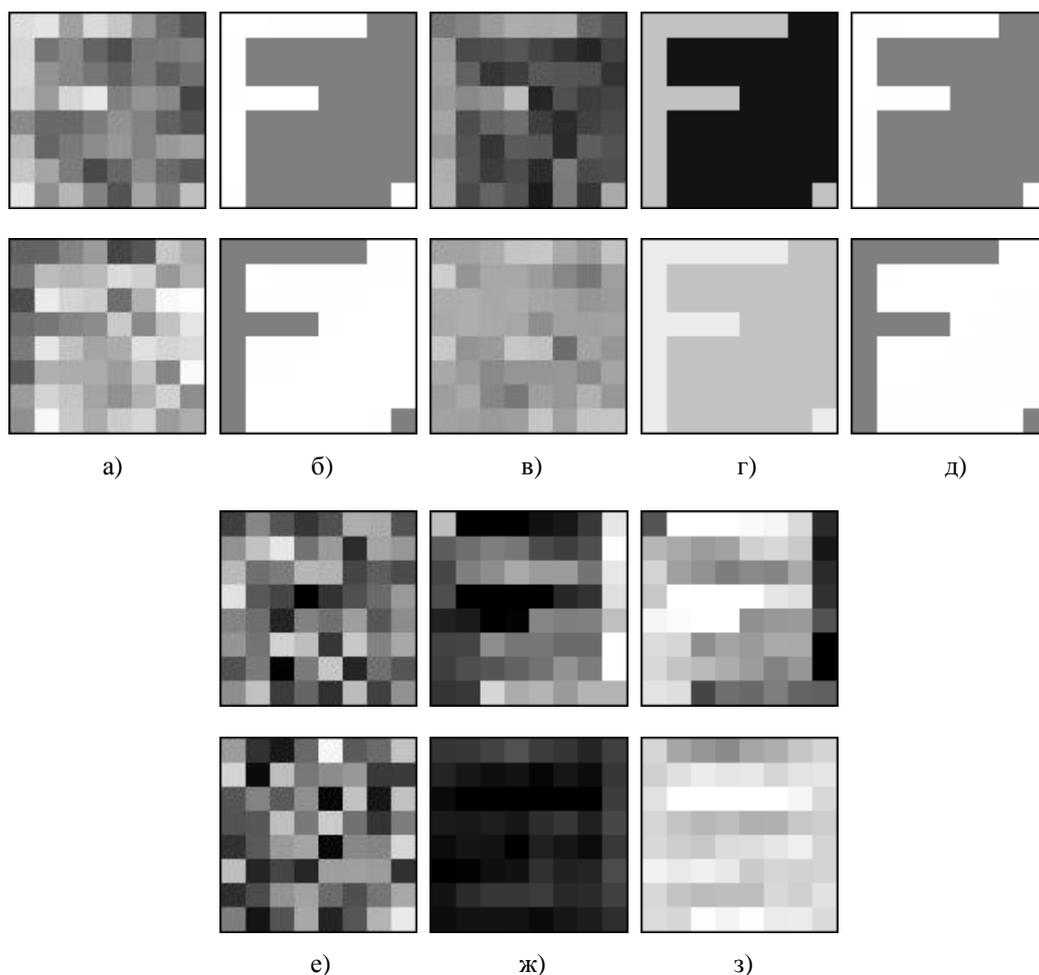


Рис. 1. Примеры восстановления комплексного объекта: успешное восстановление – начальное приближение (а) и результат (б); восстановление с точностью до фазовой константы – начальное приближение (в); результат восстановления (г) и повернутый по фазе результат восстановления (д); неудачное восстановление – начальное приближение (е); результат восстановления (ж) и попытка подобрать фазовую константу (з)

Этот эксперимент иллюстрирует принципиальную возможность восстановления комплексной функции по модулю ее фурье-образа с помощью алгоритма, аналогичного случаю реконструкции вещественного изображения. Однако здесь имеется существенный момент, с которым не приходится сталкиваться при работе с вещественной функцией. Если к фазе во всех точках объекта добавить константу, то это не повлияет на модуль фурье-образа. Поэтому восстановление комплексной функции возможно только с точностью до постоянного фазового множителя, значение которого по модулю фурье-образа определить невозможно.

Пример восстановления в этом случае также приведен на рис. 1. Можно видеть, что восстановленный из начального приближения (рис. 1, в) объект (рис. 1, г) при сохранении формы имеет фазы, отличные от приведенных на рис. 1, б. Однако если умножить полученный результат на правильно выбранный постоянный фазовый множитель (значение фазы в данном случае составляет приблизительно  $\pi/3$ ), то восстановленная функция будет практически полностью совпадать с истинной (рис. 1, д).

Неопределенность фазового множителя затрудняет визуальное сопоставление восстановленной функции с истинной. Однако это не существенно при диагностике состояния атмосферы, поскольку в этом случае фазовые искажения определяются только с точностью до постоянного слагаемого.

Таким образом, когда начальное приближение мало отличается от истинного объекта, восстановление проходит успешно. Однако в реальной ситуации подобрать приближение, близ-

кое к атмосферно-апертурной функции, которая характеризует искажающее влияние атмосферы на полученное телескопом изображение, представляется задачей невыполнимой или по крайней мере очень сложной. В то же время использование начального приближения, далекого от искомой функции (рис. 1, е), вероятность правильного решения оказывается слишком малой (рис. 1, ж, з). Для более результативного проведения реконструкции необходимо учитывать более жесткие ограничения на искомую функцию.

**4. Восстановление атмосферно-апертурной функции.** Из введенного нами в разд. 1 определения атмосферно-апертурной функции  $\tilde{A}(\xi, \eta)$  видно, что ее модуль равен единице внутри апертуры телескопа и нулю за ее пределами. Это обстоятельство можно принять в качестве дополнительного условия, налагаемого на реконструируемую функцию.

Таким образом, в алгоритм на этапе пространственной коррекции вводится дополнительная операция, которую можно было бы назвать апертурной коррекцией. При этом модули компонент текущего приближения  $\tilde{A}_{i-1}$  обращаются в ноль там, где апертурная функция  $a(\xi, \eta)$  равна нулю, и устанавливаются равными единице там, где она отлична от нуля. Накладывая жесткое условие на величину модуля атмосферно-апертурной функции, мы уменьшаем число независимых компонент восстанавливаемой функции вдвое, что должно существенно повысить вероятность правильной реконструкции.

Результаты реконструкции атмосферно-апертурной функции с учетом этого дополнительного ограничения приведены на рис. 2.

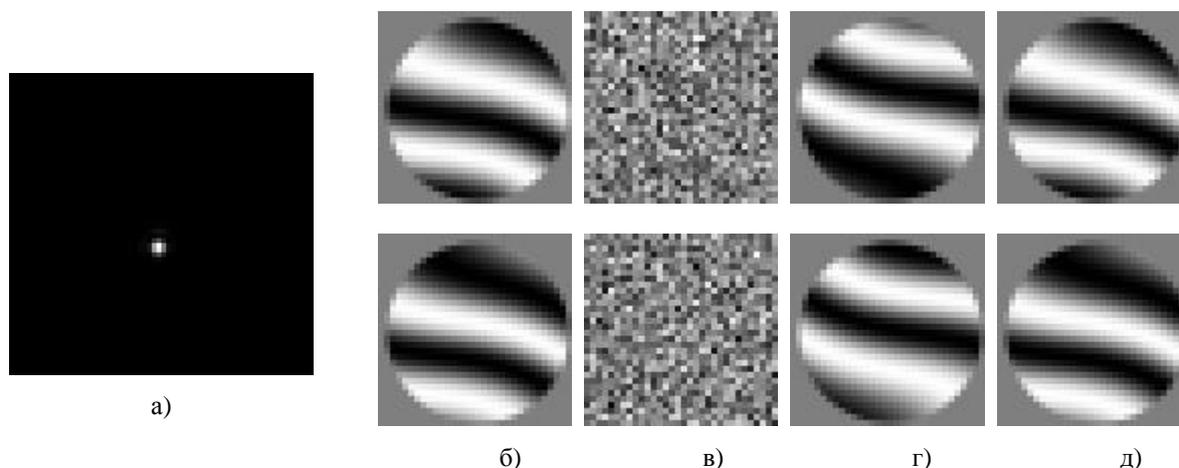


Рис. 2. Изображение неразрешимой звезды (а); атмосферно-апертурная функция, при которой было получено это изображение (б); начальное приближение для реконструкции атмосферно-апертурной функции (в); восстановленная атмосферно-апертурная функция (г); восстановленная атмосферно-апертурная функция после умножения на фазовый множитель (д)

На рис. 2, а показано изображение неразрешимой звезды в растре  $64 \times 64$  точки. Это изображение было получено путем компьютерного моделирования, поэтому истинная атмосферно-апертурная функция известна (рис. 2, б). Тем не менее при выборе начального приближения этот факт никак не использовался. Начальное приближение формировалось путем заполнения массива случайными числами с нормальным распределением (рис. 2, в). Несмотря на это, во всех проведенных экспериментах был достигнут правильный результат со спектральной погрешностью порядка  $10^{-8}$ . Пример такого результата показан на рис. 2, г, а на рис. 2, б показана та же функция после умножения на фазовый множитель, который в данном случае составил примерно  $\pi/6$ . Видно, что она визуально полностью соответствует истинной атмосферно-апертурной функции (рис. 2, б).

Как уже было сказано, вероятность правильного восстановления при случайном начальном приближении после введения дополнительного условия составила 100 %. Однако здесь надо сказать еще об одной трудности. Если кадр развернуть на  $180^\circ$  и поменять местами вещественную и мнимую части (применить комплексное сопряжение и затем умножение на мнимую единицу), то квадрат модуля фурье-образа при этом не изменится. Таким образом, в результате работы итерационного алгоритма мы можем с равной вероятностью получить как правильную атмосферно-апертурную функцию, так и преобразованную вышеупомянутым образом, и отличить один случай от другого достаточно сложно. Необходимость борьбы с таким преобразованием и принимаемые в связи с этим меры связаны с конкретным применением восстановленной функции, поэтому здесь эти вопросы не рассматриваются.

**5. Обработка серии мгновенных изображений.** В разд. 4 была показана возможность восстановления поля фазовых искажений по одному изображению неразрешимой звезды. Однако на практике иногда требуется исследовать эволюцию атмосферных фазовых искажений во времени. Для этого необходимо обработать последовательность мгновенных изображений, снятых с определенной частотой. В этом случае можно использовать корреляцию между соседними изображениями последовательности. Если интервал между кадрами достаточно мал по сравнению с временным радиусом корреляции атмосферных искажений, то соседние изображения будут мало отличаться друг от друга и в качестве начального приближения для очередного изображения можно использовать фазовое поле, реконструированное по предыдущему изображению. При этом условие близости начального приближения к искомому

результату будет выполнено и реконструкция фазового поля будет происходить гораздо быстрее.

Таким образом, процедура восстановления поля фазовых искажений как функции времени по последовательности изображений точечного источника выглядит следующим образом. Выбирается случайное начальное приближение и по нему проводится процедура реконструкции атмосферно-апертурной функции первого изображения последовательности. Результат этой реконструкции во многом будет определять время, затраченное на восстановление последующих изображений, поэтому можно поступить так: провести такую реконструкцию  $N$  раз, затем усреднить наиболее удачные из полученных функций и применить результат усреднения в качестве начального приближения для итогового восстановления первой атмосферно-апертурной функции. Подобная процедура обязательна для случая, когда вероятность правильного восстановления меньше 100 %, поскольку ошибка при реконструкции первой функции повлечет за собой неправильное восстановление атмосферно-апертурных функций для всей последовательности. Восстановленная таким образом первая атмосферно-апертурная функция затем используется в качестве начального приближения при восстановлении второго изображения серии и т. д. В результате мы получим не только пространственную картину атмосферных неоднородностей, но и изменение их во времени.

Продемонстрировать восстановление серии атмосферно-апертурных функций также можно с помощью компьютерного моделирования. На рис. 3, а, г, ж, к приведены четыре соседние из 400 модельных изображений, составляющих обрабатываемую серию. Рядом с каждым из них показана атмосферно-апертурная функция, которая использовалась при их получении (рис. 3, б, д, з, л). Видно, что отличия между этими функциями невелики, поэтому к данной последовательности можно применять описанную выше процедуру обработки. Результаты восстановления приведены на рис. 3, в, е, и, м. Они отличаются от истинных атмосферно-апертурных функций фазовыми множителями, но спектральная погрешность  $\delta$  во всех четырех случаях имеет порядок  $10^{-8}$ . Следует отметить, что величина фазового множителя определяется главным образом реконструкцией первой атмосферно-апертурной функции, а потом сохраняется практически неизменной. То же самое относится и к описанному выше преобразованию. Это происходит потому, что при достижении на первом этапе одного из решений, удовлетворяющих требованию малости спектральной погрешности, оно используется в качестве начального приближения для следующего восстановления.

Таким образом параметры этого решения (наличие преобразования и фазовый множитель отличия от истинной функции) в значительной мере распространяются на второй результат и т. д. С одной стороны, это говорит о необходимости тщательной проверки первой восстанов-

ленной атмосферно-апертурной функции, а с другой, о том, что связь между соседними функциями не будет нарушена разницей фазовых множителей или поворотов и последовательность восстановленных функций всегда будет плавно меняющейся.

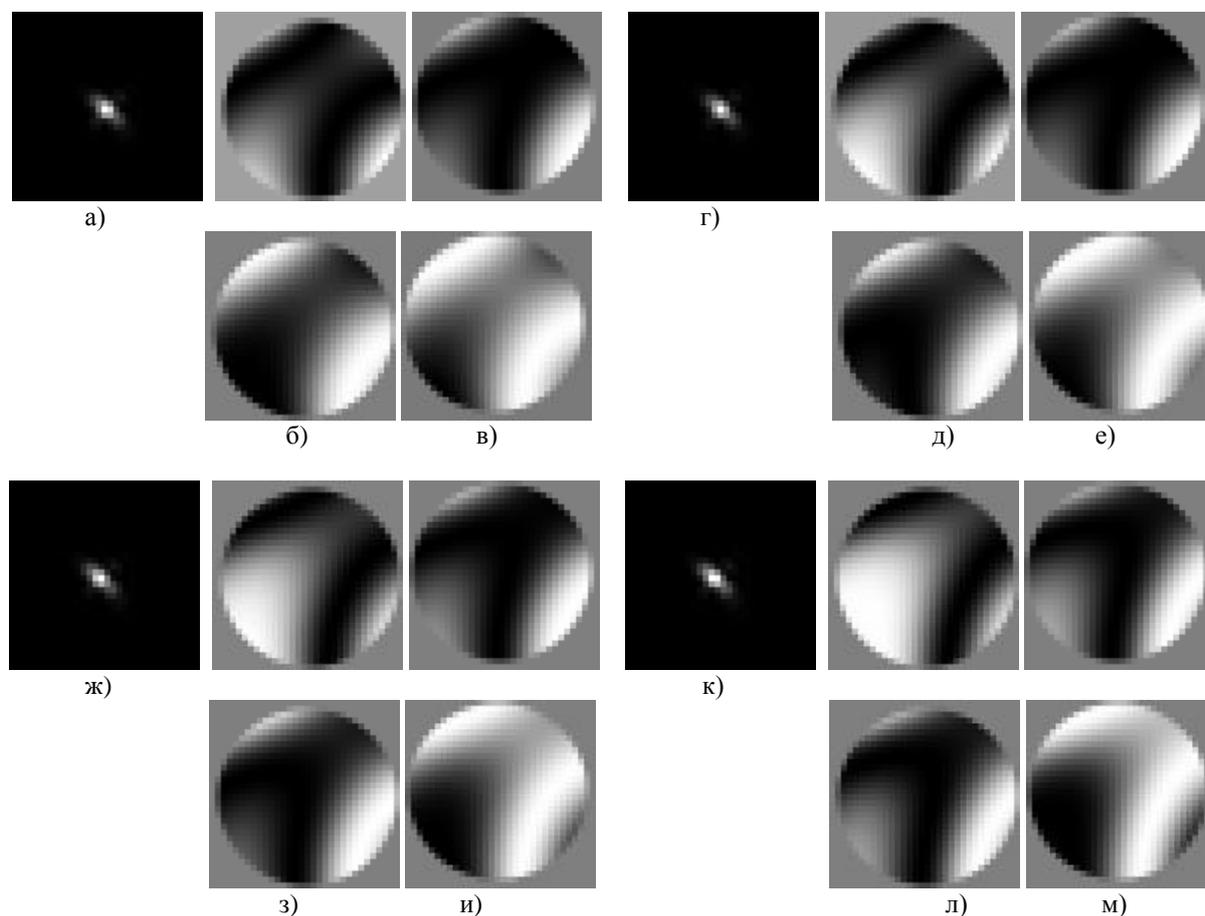


Рис. 3. Пример обработки последовательности изображений: а, г, ж, к) – изображения неразрешимой звезды; б, д, з, л) – истинные атмосферно-апертурные функции; в, е, и, м) – восстановленные атмосферно-апертурные функции

**Выводы.** Итерационный алгоритм реконструкции возник в процессе поиска возможностей преодоления мешающего влияния атмосферы на изображение объекта. Но как видно из сказанного выше, после небольшой переработки и введения оправданных с точки зрения практического применения дополнительных условий этот алгоритм можно использовать для решения не менее значимой и сложной задачи – определения параметров атмосферы по искаженному изображению неразрешимой звезды. Причем восстановление функции, характеризующей мешающее влияние атмосферы, производится с большой точностью и очень высокой вероятностью достижения правильного результата. Более того, описанный алгоритм делает возможным исследова-

ние изменения картины атмосферных неоднородностей во времени. Результаты таких исследований могут оказаться полезными, например, при изучении процессов, происходящих в атмосфере в районе съемки. Несмотря на то что лишь восстановление первой атмосферно-апертурной функции требует существенных временных затрат, а все последующие получаются гораздо быстрее, процесс все же является слишком медленным, чтобы предполагать получение результатов и их использование для учета влияния атмосферы в реальном масштабе времени (например для исследования в разд. 5 была смоделирована серия с частотой съемки 200 кадров в секунду, в то время как получение каждого результата на компьютере с процессором 2,4 ГГц занимает от 0,5 до 1 с).

Тем не менее такой способ реконструкции атмосферно-апертурной функции можно использовать при разработке новых, более результативных методов устранения мешающего влияния атмосферы на изображение объекта.

1. *Де Гроот М.* Оптимальные статистические решения. – М.: Мир, 1974. – 491 с.
2. *Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С.* Использование методов математической статистики для решения некоррктных задач // Успехи физ. наук. – 1970. – 202, вып. 3. – С. 345–386.
3. *Корниенко Ю. В.* Статистический подход к фильтрации и информативность изображения // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2005. – 10, спецвып. – С. 652–676.
4. *Дудинов В. Н.* О возможности учета погрешностей, вызванных замытием изображения планет // Астроном. журн. – 1969. – 46, вып. 5. – С. 1064–1073.
5. *Корниенко Ю. В.* Проблема углового разрешения при наблюдении астрономических объектов сквозь атмосферу // 200 лет астрономии в Харьковском университете / Под ред. проф. Ю. Г. Шкуратова. – Харьков: ХНУ, 2008. – С. 353–379.
6. *Labeyrie A.* Attainment of diffraction limited resolution in large telescopes by fourier analysing speckle patterns in star images. – *Astron. Et astrophys.* – 1970. – 6, No. 1. – P. 85–87.
7. *Корниенко Ю. В.* О возможности восстановления изображения слабого объекта, искаженного влиянием земной атмосферы // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1977. – № 10. – С. 931–933.
8. *Fienup J. R.* Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform // *Opt. Lett.* – 1978. – 3. – P. 27–29.
9. *Кнох К. Т., Thompson B. J.* Recovery of images from atmospherically degraded short-exposure photographs // *The astrophysical journal.* – 1974. – 193. – P. L45–L48.
10. *Fienup J. R., Wackerman C. C.* Diffraction-limited imaging of space objects III // Final Report, 1 Mar. 1982 – 31 Oct. 1985. Environmental Research Inst. of Michigan, Ann Arbor. – 1986.
11. *Бабичев А. А., Корниенко Ю. В., Парусимов В. Г. и др.* Цифровая обработка астрономических изображений // Тр. 14-го Междунар. конгр. по высокоскоростной фотографии и фотонике. – М., 1980. – С. 436–439.
12. *Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И.* О реконструкции изображения объекта по модулю его фурье-образа // Ра-

- диофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2008. – 13, № 1. – С. 130–141.
13. *Дж. Гудмен.* Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988. – 327 с.

## RECOVERING PHASE DISTORTIONS FIELD UNDER THE IMAGE OF POINT SOURCE

S. I. Skuratovskiy

The possibility of recovering complex function under the modulus of its fourier-transform is discussed. By means of computer experiment it is shown that it is possible to apply iterative reconstruction procedure developed for real images to complex function and the result will be obtained accurate to a constant phase factor. It is confirmed that in the general case the possibility of obtaining correct result is much less compared to real image reconstruction. Some practically-justified additional conditions must be used to rise the possibility of correct reconstruction.

**Key words:** vision through turbulent atmosphere, speckle-interferometry, determination of atmosphere parameters.

## ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛЯ ФАЗОВИХ СПОТВОРЕНЬ ЗА ЗОБРАЖЕННЯМ ТОЧКОВОГО ДЖЕРЕЛА

С. И. Скуратовський

Досліджено можливість відновлення комплексної функції за модулем її фур'є-образу. За допомогою комп'ютерного експерименту показано, що шляхом використання ітераційної процедури, аналогічній тій, що застосовувалася раніше для реконструкції дійсних зображень, можна відновити комплексну функцію з точністю до постійного фазового множника. Підтверджено, що у загальному випадку точне відновлення менш імовірно, ніж при роботі з дійсним об'єктом. Проте внесення виправданих з точки зору практичного використання додаткових умов дозволяє істотно підвищити ймовірність правильного відновлення.

**Ключові слова:** бачення крізь турбулентну атмосферу, спекл-інтерферометрія, визначення параметрів атмосфери.

*Рукопись поступила 24 мая 2009 г.*