

Г. А. АКИМОВА, В. В. МАТАЙБАЕВ, Ю. П. СЫРЫХ, А. В. ФРОЛОВ
(Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

В настоящее время все большее практическое применение находят методы восстановления изображения объекта по дифракционной картине (амплитуде его пространственного спектра) [1]. Широкое распространение получили различные итерационные алгоритмы, которые обеспечивают решение данной задачи при наличии априорной информации относительно объекта. В качестве такой информации часто используется условие, что функция, описывающая объектное поле, действительна и неотрицательна [2]. В [3] показано, что для достижения восстановления достаточно одного условия действительности. Наиболее сложную проблему с точки зрения имеющейся в распоряжении исследователей априорной информации составляет задача восстановления изображения, когда объектное поле описывается комплексной функцией. В данной работе показана возможность восстановления изображения и для объектов такого вида.

Можно выделить два практически важных случая фазового распределения величины объектного поля, соответствующих диффузно рассеивающим и зеркально отражающим предметам.

В первом случае объект описывается действительной функцией, модулированной случайным фазовым распределением. В [4, 5] показано, что рассматриваемая задача допускает решение при наличии достаточно точных данных о величине носителя объекта. При этом незначительные погрешности в его определении приводят к существенному увеличению требуемого числа итераций. Информация о носителе объекта, как правило, отсутствует. По автокорреляционному образу можно сделать только его грубую оценку с точностью, не всегда достаточной для применения в итерационной процедуре. Это ограничивает область использования итерационных алгоритмов.

Следует отметить, что при наличии априорной оценки фазы спектра объекта, достаточно близкой к искомому решению, восстановления можно достичь даже при отсутствии точных данных о носителе [6]. Таким образом, вопрос состоит в том, чтобы найти способ, позволяющий обеспечить удачный выбор начального приближения или получить оценку носителя объекта, достаточно близкую к нему. Оказывается, что для диффузно рассеивающих плоских предметов данная задача может быть решена даже без привлечения дополнительной априорной информации.

Задачу восстановления изображения можно сформулировать в следующем виде. Требуется найти амплитуду комплекснозначной функции $f(x) = |f(x)| \exp[i\psi(x)]$, $f(x) \in L_2$, $x \in R_2$, отличной от нуля на конечной области γ , по величине амплитуды $A(u)$, $u \in R_2$, функции $F(u)$, связанной с $f(x)$ преобразованием Фурье, где $x = (x, y)$ и $u = (u_1, u_2)$ соответствуют декартовым координатам в объектной и спектральной плоскостях. В данной задаче решения, полученные с точностью до линейного сдвига l объекта $f(x) \rightarrow f(x+l)$ и его поворота на 180° вокруг начала координат $f(x) \rightarrow f^*(-x)$, рассматриваются как эквивалентные.

Заметим, что в общем случае решение задачи соответствует восстановлению как амплитуды, так и фазы $\psi(x)$ (с точностью до произвольной постоянной). Однако для диффузно рассеивающих плоских объектов полученное распределение фазы $\psi(x)$ не имеет практического значения.

Для исследования возможности восстановления изображения использовалась модифицированная процедура, предложенная в [7]. Она основана на совместном применении двумерных амплитудно-фазовых соотношений и итерационного алгоритма. Непосредственное использование аналитического выражения, связывающего фазу $\varphi(u)$ функции $F(u)$ с распределением ее амплитуды $A(u)$, дает возможность восстановить изображение объекта в общем случае лишь приближенно. Это в основном обусловлено существованием нулей аналитического продолжения $F(u)$ в комплексной плоскости. Поэтому результаты восстановления изображения с помощью указанных соотношений использовались в качестве начального приближения итерационного алгоритма.

Таким образом, процедура восстановления состоит из следующих операций.
1. Вычисляется фазовое распределение $\varphi_0(u)$ по известной величине амплитуды $A(u)$ с помощью амплитудно-фазовых соотношений. В данной работе предполагается, что амплитуда $A(u)$ известна точно. Однако при численных расчетах величина $\ln A(u)$ в случае, когда $A(u)$ обращается в нуль, доопределялась средним значением по ближайшим отсчетам. Как показывают многочисленные результаты моделирования, полученное при этом фазовое распределение позволяет восстановить картину, отражающую структуру объекта достаточно хорошо для начала итерационной процедуры [7, 8].

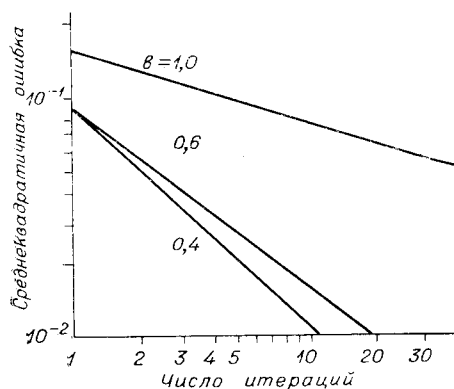


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичной ошибки восстановления $f(x)$ от числа итераций при различной величине амплитуды случайной фазовой модуляции b

2. Определяется начальное приближение для итерационной процедуры. Для этого вычисляется оценка объектной функции

$$f_0(x) = \mathcal{F}\{A(u)\exp[i\varphi_0(u)]\},$$

где \mathcal{F} — оператор преобразования Фурье. Данное распределение позволяет достаточно точно установить носитель объекта, определяя множество значений $\gamma = \{x\}$, для которых $|f_0(x)|$ превышает некоторое пороговое значение ρ_0 . Для его вычисления

$$f_{k+1} = \begin{cases} f_k(x) - \beta f'_k(x), & x \notin \gamma, \end{cases}$$

где $f'_k(x)$ представляет собой фурье-образ функции $A(u)\exp[i\varphi_k(u)]$; β — некоторая постоянная. В данном случае величина β полагалась равной 0,5.

При моделировании восстановления изображения объекта указанного вида в качестве модели использовалась функция $f(x) = Be^{i\psi}$, где $\psi = 2\pi a$, $B = \text{const}$, a принимает в каждой точке случайное значение равномерно из интервала $(-b, b)$. На рис. 1 представлены кривые, отражающие зависимость нормированной среднеквадратичной ошибки восстановления от числа итераций при различной амплитуде случайной фазовой модуляции b . Приведенные кривые свидетельствуют, что скорость сходимости процедуры уменьшается с увеличением b . Однако процедура сходится даже при $b = 1$.

Следует отметить, что указанный тип объектов соответствует δ -коррелированной фазовой модуляции. Он является частным случаем объектов более общего вида, у которых характерный размер изменения фазы $\psi(x)$ объектного поля много меньше размера изменения амплитуды $B(x) = |f(x)|$.

Рассмотрим автокорреляционный образ функции $f(x)$ для таких объектов:

$$R(x) = \int f(x') f^*(x+x') dx'. \quad (1)$$

Как известно, $R(x)$ связан фурье-преобразованием с величиной интенсивности спектра $I(u) = |F(u)|^2$. Будем считать, что радиус корреляции ρ функции $\psi(x)$ мал по сравнению с характерным размером изменения амплитуды. Тогда, выбирая такое значение $a \gg \rho$, для которого $\left| \frac{\partial B(x)}{\partial x} \right| a \ll |B(x)|$, с учетом статистической однородности $\psi(x)$ выражение (1) можно переписать в виде

$$R(x) \simeq \sum_m B(ma) B(ma+x) \int \exp[i\psi(x') - i\psi(x+x')] dx'.$$

Предположим, что фазовые флуктуации $\psi(x)$ имеют нулевое среднее и принимают случайные значения с нормальным законом распределения вероятности. Тогда для функции автокорреляции воспользуемся оценкой [9]

$$R(x) \simeq \sum_m B(ma) B(ma+x) \exp(-\sigma_\psi^2) \exp[K_\psi(x)],$$

где σ_ψ^2 — величина дисперсии фазовых флуктуаций; $K_\psi(x)$ — функция корреляции $\psi(x)$. Полагая, что величина σ_ψ^2 мала, разложим $e^{K_\psi(x)}$ в ряд с точностью до первого члена. В результате

$$R(x) \simeq e^{-\sigma_\psi^2} R_0(x) + K_\psi(x) e^{-\sigma_\psi^2} R_0(x), \quad (2)$$

где $R_0(x) = \sum_m B(ma) B(ma+x)$. Следовательно, если радиус корреляции функ-

Рис. 2. Пример восстановления изображения объекта со случайной фазовой модуляцией:
 а — исходный объект; б — результат восстановления после 10 итераций; в — результат восстановления после 10 итераций с предварительной фильтрацией модуля спектра

ции $\psi(x)$ мал по сравнению с характерным размером изменения $B(x)$, то $R(x)$ практически пропорциональна $R_0(x) \simeq \int B(x') B(x+x') dx'$ всюду, за исключением области вблизи начала координат этого же радиуса. В этом смысле можно рассматривать $\psi(x)$ как фазовый шум, фокусирующийся в центральной части автокорреляции. Его влияния можно избежать или, по крайней мере, существенно сократить путем фильтрации. Если априори известно, что $\psi(x)$ — шумоподобная функция, то естественно ограничиться восстановлением сглаженной амплитуды объектного поля. Легче всего этого можно достичь путем фильтрации интенсивности спектра. При этом выбор параметров фильтра определяется шириной центрального пика автокорреляции в соответствии с (2). В результате выполнения такой операции обеспечивается лишь приближенное восстановление $f(x)$. Однако полученная оценка $f(x)$ позволяет уточнить параметры объекта, в частности его носитель, и тем самым может служить в качестве исходных данных для следующих шагов итерационного алгоритма с первоначальным спектром.

На рис. 2 изображены типичные примеры восстановления изображения комплекснозначного объекта рассматриваемого вида по модулю его фурье-преобразования.

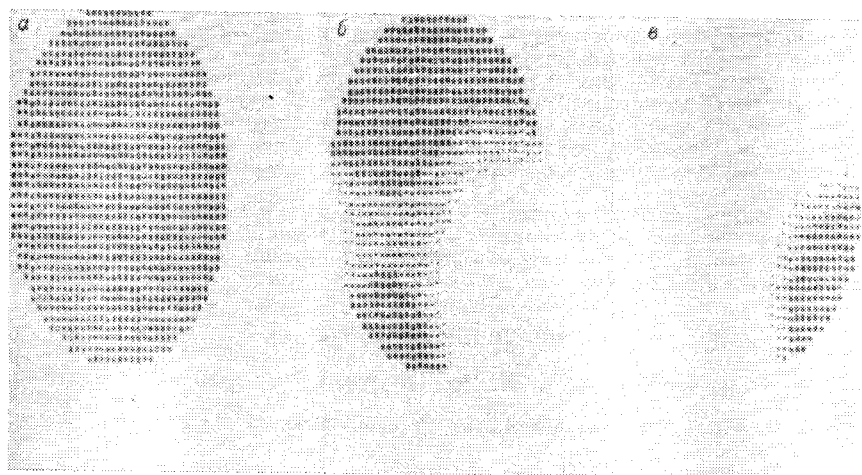


Рис. 3. Объект, моделирующий апертуру оптической системы с фазовыми aberrациями:
 а — амплитуда объекта; б — положительная часть фазы объекта; в — отрицательная часть фазы объекта



Рис. 4. Результат восстановления после 100 итераций модельного объекта, представленного на рис. 3:

a — амплитуда; *b* — положительная часть фазы объекта; *в* — отрицательная часть фазы

Объект, взятый для расчетов, имел постоянную амплитуду внутри носителя (рис. 2, *a*). Соответствующее ему фазовое распределение на рисунке не показано. Оно имело вид случайной функции с $b = 0,5$. Изображение, полученное в результате применения указанной процедуры с десятью итерациями, приведено на рис. 2, *б*. Здесь уже заметны основные черты восстанавливаемого изображения. Для сравнения на рис. 2, *в* показан результат восстановления, полученный после выполнения той же процедуры, но с дополнительной операцией фильтрации.

Приведенная картина достаточно хорошо соответствует исходному объекту. В качестве фильтра использовалась весовая функция в виде распределения Лоренца $p(x) = 1/(1 + \alpha(x - x_0)^2)$, параметр α которой выбирался по виду автокорреляции и $\alpha \sim 0,005$. Следует заметить, что условие постоянства амплитуды исходного объекта нигде в процедуре восстановления не учитывалось.

Значительно более сложным является второй случай, когда характерный размер изменения фазы становится сравнимым с характерным размером изменения амплитуды. Тем не менее особенность применения амплитудно-фазовых соотношений состоит в том, что она позволяет оценить не только амплитуду, но и фазу объектного поля. Поэтому существует возможность определения объектной функции и в этом случае. Ниже приведены результаты, полученные при восстановлении одного из таких объектов. Он моделировал оптическую систему с круглой апертурой (рис. 3, *a*) с фазовыми aberrациями в виде ряда по полиномам Церинке. Положительная и отрицательная части $\psi(x)$ изображены на рис. 3, *б* и *в* соответственно. В результате применения процедуры со 100 итерациями получено изображение, приведенное на рис. 4, *a*. Восстановленный при этом фазовый профиль объекта (отрицательная и положительная части) показан на рис. 4, *б*, *в*. Здесь наблюдается удовлетворительное соответствие восстановленной картины и модельного объекта. Для увеличения скорости сходимости процедуры перед началом итераций амплитуда объектного поля внутри носителя заменялась случайными значениями. Распределение фазы при этом сохранялось. Затем осуществлялся процесс итераций. Следует отметить, что в этом случае результат восстановления существенным образом зависит от вида модельной функции.

Таким образом, представленные в работе результаты свидетельствуют о возможности восстановления изображений объектов, описываемых комплексозначными функциями, по амплитуде их пространственного спектра без использования априорной информации о самом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Г. И., Тараторкин А. М. Восстановление изображений.— М.: Радио и связь, 1986.
2. Fienup I. R. Phase retrieval algorithms: A comparison // Appl. Opt.— 1982.— 21, N 15.
3. Аистов А. В., Амелин В. В. О возможности восстановления ограниченных объектов по модулю спектра // Оптика и спектроскопия.— 1985.— 59, № 3.
4. Fienup I. R. Reconstruction of a complex-valued object from a modulus of its Fourier transform using a support constraint // JOSA. A.— 1987.— 4, N 1.
5. Lane R. G. Recovery of complex images from Fourier magnitude // Opt. Commun.— 1987.— 63, N 1.

6. Бакалов В. П., Шитов К. М. Моделирование процесса восстановления двумерного комплексного сигнала по амплитудному спектру при частично искаженном фазовом спектре // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1986.— 29, № 9.
7. Акимова Г. А., Сырых Ю. П., Фролов А. В. О восстановлении двумерного объекта по модулю его фурье-преобразования // Автометрия.— 1988.— № 1.
8. Акимова Г. А., Матайбаев В. В., Сырых Ю. П., Фролов А. В. Итерационный метод решения фазовой задачи // Радиотехника.— 1989.— № 4.
9. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику.— М.: Наука, 1978.— Ч. 2.

Поступило в редакцию 21 февраля 1989 г.

УДК 681.327

В. Н. ВЬЮХИН, Ю. Л. ТАНИ
(Новосибирск)

АДАПТЕР ШИН РС/АТ — VME

В последнее время, наряду с большими и мини-машинами, в системах сбора и обработки информации находят все большее применение микроЭВМ и персональные компьютеры (РС). Обладая цветной графикой, большим набором прикладных программ, РС значительно улучшают интерфейс с пользователем. С другой стороны, среди вычислительных систем широкое распространение получили комплексы на основе стандарта VME. В последнее время стандарт VME используется для разработки систем автоматизации и систем сбора и обработки информации. При разработке АРМ исследователи на основе стандарта VME в качестве управляющей машины выбран персональный компьютер РС/АТ и возникла необходимость в адаптере к РС для управления магистралью VME. Исходя из этого, спроектирован адаптер шин РС — VME, ориентированный на использование в составе АРМ. Так как при разработке АРМ не ставилась задача обеспечения полного протокола VME, в адаптере часть функций VME не реализована: отсутствует возможность работы в многопроцессорных системах, нет поддержки циклов VME «только адресация» и «блочная передача».

Адаптер последовательной связи, входящий в состав стандартного оборудования РС, не обеспечивает необходимую скорость передачи данных, и поэтому был разработан адаптер, использующий параллельную линию связи и обеспечивающий согласование протокола обмена синхронной шины РС/АТ и асинхронной линии VME.

Для согласования протоколов магистрали VME и шины РС цикл VME необходимо «привязать» к циклу РС, а процедуру обмена завершить за время цикла РС. При использовании РС с тактовой частотой 8/10 МГц модулям VME необходимо децифровать адрес и подготовить (или принять) данные за 100—150 нс. Это время может оказаться недостаточным для некоторых модулей, и поэтому для обеспечения надежного обмена адаптер должен удлинить стандартный цикл РС за счет ввода дополнительных тактов ожидания до получения ответа от модуля. Если по истечении времени максимального числа дополнительных тактов подтверждения так и не поступило, адаптер должен прервать обмен и через прерывание сообщить об ошибке. В разработанном адаптере максимальное число дополнительных тактов 10, по истечении которых происходит прерывание с вектором 72h.

Так как адаптер проектировался для системы с одним ведущим (РС), проблемы арбитража не возникало, однако в многопроцессорных системах VME она существует. Если другое активное устройство захватило шину, даже когда РС имеет высший приоритет, то всегда существует вероятность того, что ведущий не успеет освободить шину за время, в течение которого РС сможет провести обмен (максимальное удлинение цикла РС 2 мкс). Возможный выход из этой ситуации — повторные обращения к модулям с удержанием шины до «удачной» попытки или постоянное обладание шиной с сообщением РС о том, что кто-то хочет произвести обмен (например, по прерыванию).

Согласование разрядности шин адресов и данных РС/АТ и VME не составляет особых трудностей, VME допускает следующие форматы адреса и данных: короткая адресация — 15 разрядов адреса A1...A15; стандартная адресация — 23 разряда A1...A23 и расширенная адресация — A1...A31 (здесь используются, кроме линий A1...A23 на основном разъеме, линии A24...A31 на дополнительном разъеме). Что касается формата шины данных, то D0...D15 находятся на основном разъеме, а D16...D31 — на дополнительном, и из этого вытекают два формата: 16- и 32-разрядный обмен. В АРМ использовался только основной разъем, и максимальная разрядность данных — 16 разрядов, адреса — 23 разряда. Персональный компьютер РС/АТ имеет разрядность — 24 разряда адреса и 16 разрядов данных. Часть этого адресного пространства занимают ОЗУ и ПЗУ, остальное отведено пользователю, и в нем можно разместить адреса модулей VME.