АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1997, том 43, № 2, с. 187–193

УДК 681.7:534.883

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД СЛОЕМ РАССЕИВАТЕЛЕЙ ЗВУКА

© 1997 г. Н. В. Зуйкова, Т. В. Кондратьева, В. Д. Свет

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 20.11.95 г.

Рассмотрено применение методов спекл-интерферометрии для определения глубины расположения объекта, находящегося под слоем рассеивателей. Показано, что предлагаемые алгоритмы позволяют оценить расстояние до объекта и самого слоя с точностью, определяемой волновым размером приемной антенны. Алгоритмы работоспособны и в том случае, когда за время перемещения освещающего источника слой может частично изменить свои параметры.

В предыдущей работе [1] на основе методов спекл-интерферометрии была рассмотрена возможность измерения относительного углового перемещения точечного объекта, находящегося за слоем с сильным рассеянием. Численное моделирование предложенных алгоритмов обработки показало, что разрешающая способность может быть не хуже, чем в однородной среде при условии, что при перемещении источника слой рассеивателей существенно не изменяет своих параметров.

Ниже мы рассмотрим применение методов спекл-интерферометрии для решения задачи определения глубины (расстояния) залегания объекта, находящегося под слоем рассеивателей. Практически такие задачи часто встречаются в сейсмоакустике, ультразвуковой медицинской диагностике и дефектоскопии. Общим для этих задач является то, что положение объекта и рассеивателей остается длительное время неизменным, а положение освещающего звукового источника нам точно известно, как и его возможные перемещения.

Обратимся к рис. 1, на котором приведена схема рассматриваемой задачи. Источник звука "О" с длиной волны излучения λ расположим в дальней волновой зоне приемной антенны длиной L и N приемниками, т.е. $R \gg \frac{2L^2}{\lambda}$. Слой рассеивателей поместим на расстояние r_c от антенны, а объект расположим за слоем рассеивателей на расстоянии r_0. Так же, как и в работе [1], предположим, что рассеивающий слой вносит фазовые искажения в освещающее поле, абсолютные значения которых могут соответствовать 2π и более.

Наша задача заключается в определении расстояний r_0 и r_c, которые априорно нам неизвестны. Если на антенне укладывается хотя бы несколько интервалов пространственной корреляции случайной функции фазы, то информация об объекте при обычных способах локации будет полностью потеряна, поскольку подобная мультипликативная помеха является непреодолимым препятствием для восстановления изображения объекта.

Воспользуемся теперь подходом, развитым в [1]. Рассеянное поле на антенне обозначим через $A(x)*\exp[jk\psi(x)]$, где $k = 2\pi/\lambda$. Далее для простоты пренебрежем амплитудной информацией и будем оперировать только с функцией фазы $\psi(x)$. В голографии такая операция соответствует "выбеливанию", при котором все детали восстановленного изображения сохраняются, так как информация об относительных расстояниях между частями объекта заключается только в фазе зарегистрированного поля.

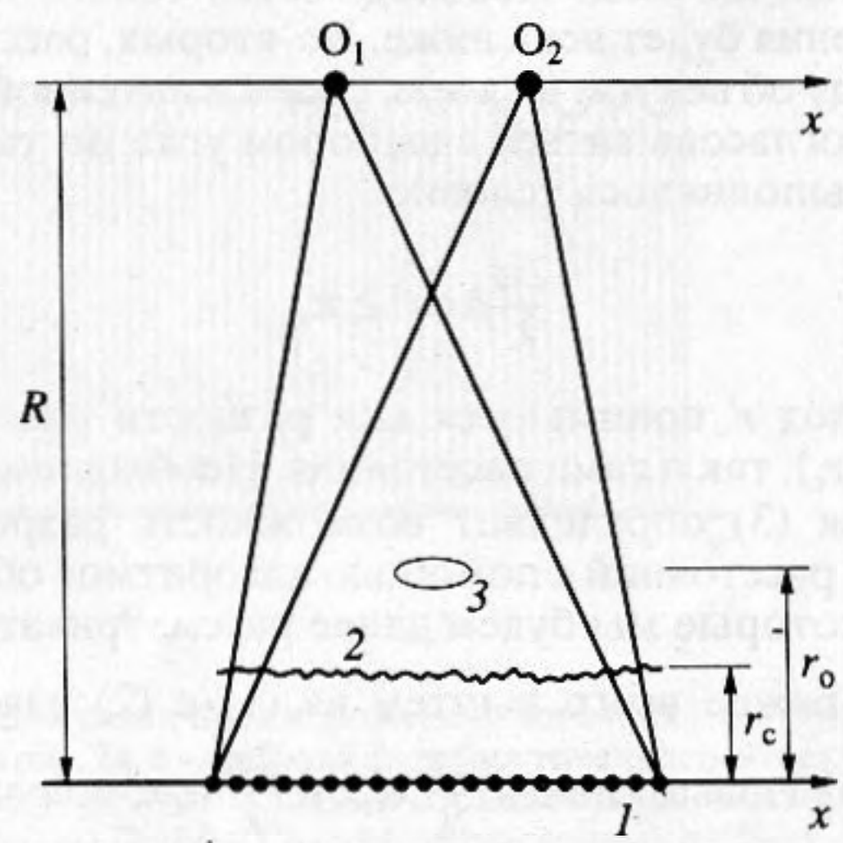

Рис. 1. Схема эксперимента. *1* – антенная решетка, *2* – слой неоднородностей, *3* – объект.

Пусть фазовая структура слоя неоднородностей описывается функцией $\psi_c(x)$, а объекта – $\psi_0(x)$. Если источник "О" освещает антенну плоской волной по нормали к антенне, то фазовый фронт на антенне равен сумме $\psi(x) = \psi_c(x) + \psi_0(x)$. Если освещение осуществляется под углом α_1 (относительно нормали к антенне), то

$$\psi_1(x) = \psi_0(x + \Delta_{01}) + \psi_c(x + \Delta_{c1}) + \frac{2\pi}{\lambda}\alpha_1 x, \quad (1)$$

где Δ_{01} и Δ_{c1} – сдвиги, равные $\alpha_1 r_0$ и $\alpha_1 r_c$, соответственно. Последнее слагаемое в (1) описывает наклон освещающей волны.

Переместим теперь источник "О" в положение O_2 с углом наклона α_2, причем перемещение O_1O_2 выберем таким, чтобы разность $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ была не меньше дифракционного разрешения антенны, т.е. $\Delta\alpha \geq \frac{\lambda}{L} = \frac{2}{N}$, если приемники в антенне расположены с интервалом дискретизации $\lambda/2$. Новый фазовый фронт по аналогии с (1) обозначим как

$$\psi_2(x) = \psi_0(x + \Delta_{02}) + \psi_c(x + \Delta_{c2}) + \frac{2\pi}{\lambda}\alpha_2 x. \quad (2)$$

Система уравнений (1), (2) содержит два неизвестных и интересующих нас параметра – величины r_c и r_0. Углы α_1 и α_2, как и форма освещающего пучка, заданы априорно. Фазовые функции $\psi_0(x)$ и $\psi_c(x)$ нам, естественно, неизвестны. Однако, воспользовавшись подходом, развитым в [1], можно определить параметры r_0 и r_c при достаточно произвольных видах функций $\psi_0(x)$ и $\psi_c(x)$, если они остаются одинаковыми при перемещении источника из точки O_1 в точку O_2.

Сделаем некоторые предположения относительно функции $\psi_0(x)$. Прежде всего будем полагать, что угловой размер объекта по оси "X" достаточно мал. Необходимость такого предположения будет ясна ниже. Во-вторых, расстояния между объектом и слоем, слоем и антенной должны согласовываться с выбором угла $\Delta\alpha$ так, чтобы выполнялось условие

$$\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\alpha r' \geq \pi, \quad (3)$$

где под r' понимаются как разности расстояний $(r_0 - r_c)$, так и сами расстояния. Необходимость условия (3) определяет возможность разрешения этих расстояний с помощью алгоритмов обработки, которые мы будем далее рассматривать.

Прежде всего вычтем из (1) и (2) известные нам фазовые сдвиги $\frac{2\pi}{\lambda}\alpha_1 x$ и $\frac{2\pi}{\lambda}\alpha_2 x$, получим:

$$\psi_1(x) = \psi_0(x + \Delta_{01}) + \psi_c(x + \Delta_{c1}), \quad (4)$$

$$\psi_2(x) = \psi_0(x + \Delta_{02}) + \psi_c(x + \Delta_{c2}). \quad (5)$$

Далее, согласно [1], вычислим функционалы

$$C(y) = \mathrm{Covar}(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_1(x)\psi_2(x - y)dx \quad (6)$$

и

$$D(y) = \mathrm{Div}(y) = F_y^{-1}[B(\eta)], \quad (7)$$

где

$$B(\eta) = \frac{\Lambda_1(\eta)}{\Lambda_2(\eta)},$$

$$\Lambda_1(\eta) = F_\eta[\psi_1(x)], \ \Lambda_2(\eta) = F_\eta[\psi_2(x)],$$

а операторы F и F^{-1} означают прямое и обратное преобразования Фурье, соответственно.

Для того, чтобы более наглядно показать, каким образом, используя алгоритмы (6) и (7), можно определить искомые параметры r_0 и r_c, проиллюстрируем обработку на конкретном примере численного моделирования алгоритмов (6) и (7). Пусть слой рассеивателей расположен на глубине $r_c = 128\lambda$. Функция слоя $\psi_c(x)$ – случайна и изменяет свои значения от 0 до 2π в каждой точке с шагом $\lambda/2$. Предположим, что объект "точечный", его размер равен $\lambda/2$, а создаваемый им фазовый сдвиг равен $\psi_0(x) = \pi$. Расстояние до объекта выберем равным $r_0 = 192\lambda$. Число приемников в антенне $N = 128$ и, следовательно, ее угловое разрешение равно $\delta\alpha = 2/N = 1/64$. На рис. 2а представлены распределения функций $\psi_1(x)$ и $\psi_2(x)$ при двух различных положениях источника O_1 и O_2, а на рис. 2б – результаты обработки по алгоритмам (6) и (7). Максимумы функций сдвинуты на величину $\Delta y_c = \Delta_{c2} - \Delta_{c1} = \Delta\alpha r_c = 2\lambda$, т.е. на четыре отсчета в единицах длины антенны. А так как величины $\Delta\alpha$ и λ известны, то по величине Δy_c можно сразу определить глубину залегания слоя r_c.

Перейдем теперь к процедуре определения глубины залегания объекта r_0. Поскольку величина Δy_c определена, сдвинем функцию $\psi_1(x)$ на Δy_c, т.е. получим $\psi_1(x + \Delta y_c)$ и образуем разность функций

$$\begin{aligned}\psi_2(x) - \psi_1(x + \Delta y_c) &= \\ = \psi_0(x + \Delta_{02}) - \psi_0(x + \Delta_{01} + \Delta y_c).\end{aligned} \quad (8)$$

Функции $\psi_c(x + \Delta_{c1})$ и $\psi_c(x + \Delta_{c2})$ при этом взаимно уничтожатся. Положительную часть (8) оставим без изменения, а отрицательную часть (8) снова сместим на величину Δy_c, но в обратную сторону, т.е. $\psi_0(z + \Delta_{01} + \Delta y_c - \Delta y_c) = \psi_0(x + \Delta_{01})$. Такое разделение функции (8) на положительную и отрицательную части легко выполнить, поскольку

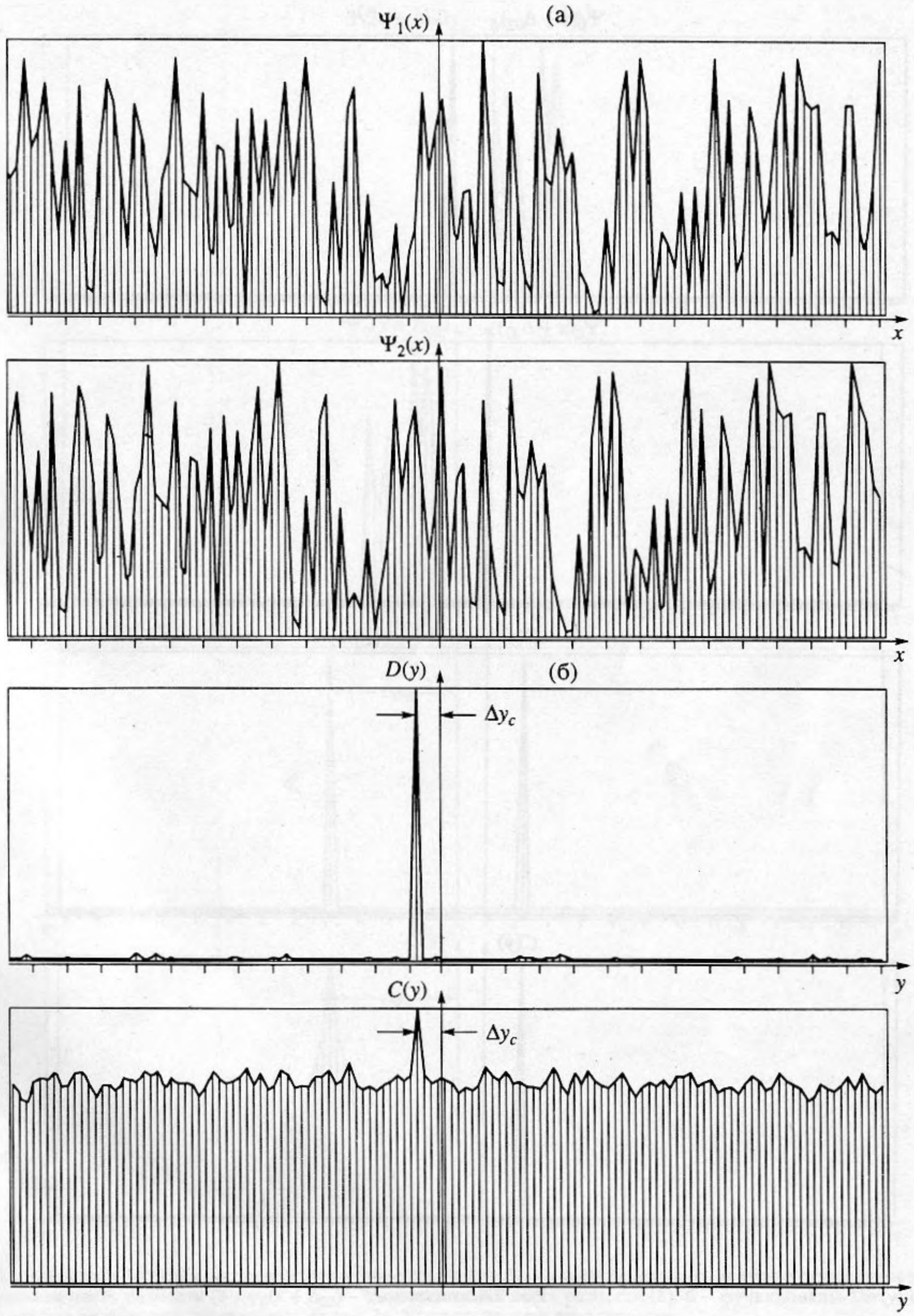

Рис. 2. а – распределения функций фазы $\psi_1(x)$ и $\psi_2(x)$ на антенне при двух различных положениях источника. б – функционалы для Div(y) и Covar(y) от функций $\psi_1(x)$ и $\psi_2(x)$, показанных на рис. 2а. в – фазовая функция точечного объекта, выделенная из $\psi_1(x)$ и $\psi_2(x)$; $\psi_2(x + \Delta_{01})$ – смещенная на Δy_c и взятая с обратным знаком отрицательная часть разности (8); $\psi_0(x + \Delta_{02})$ – положительная часть разности (8). г – функционалы Div(y) и Covar(y), вычисленные от функций $\psi_0(x + \Delta_{01})$ и $\psi_0(x + \Delta_{02})$, показанных на рис. 2в. (Смещение $\Delta y = \Delta\alpha r_0 = 3\lambda$ или шести отсчетам в единицах длины антенны: $r_0/r_c = 192\lambda/128\lambda = 3/2$).

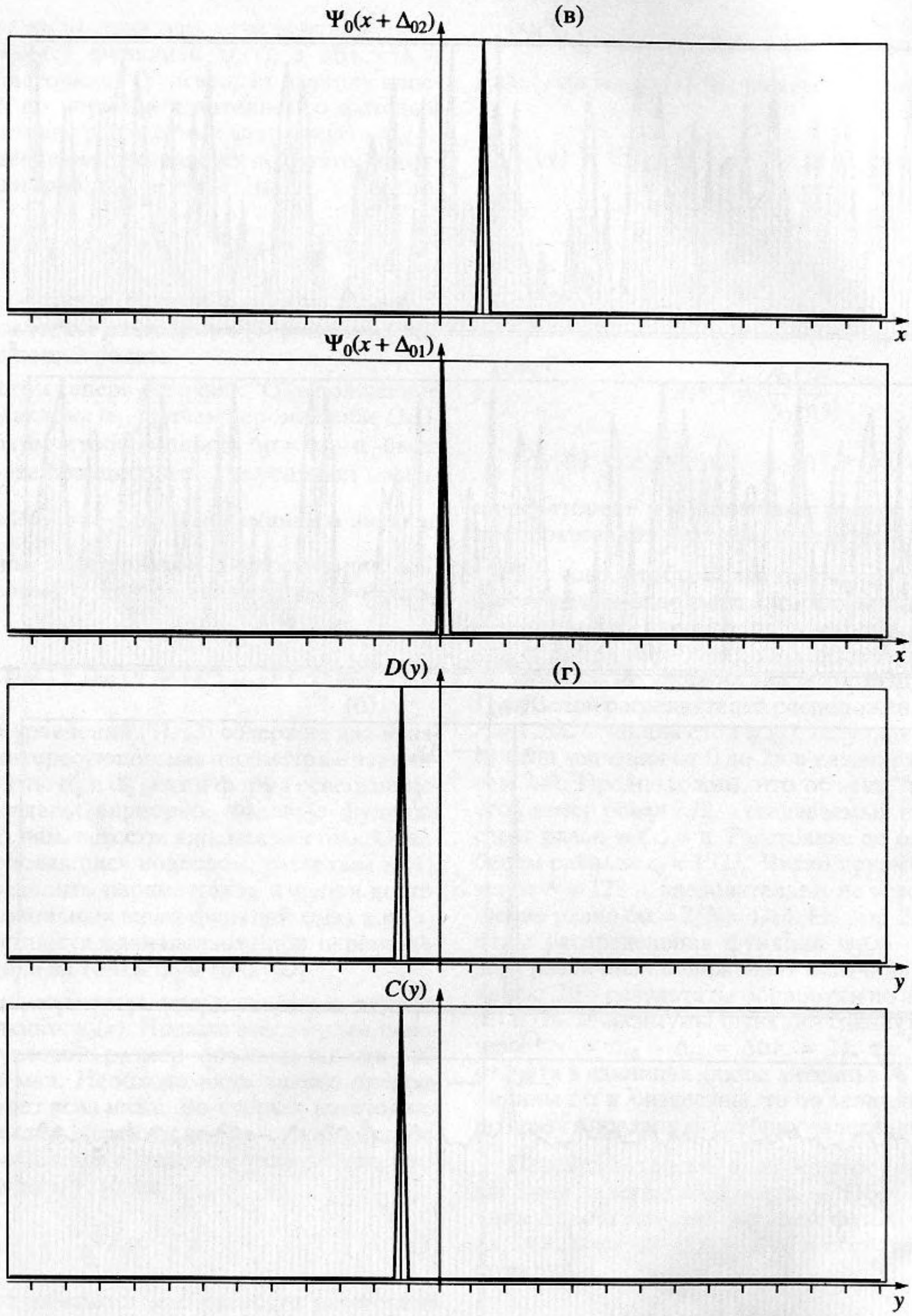

Рис. 2. Окончание.

фаза изменяется в долях 2π от нуля и выше и не изменяет знака.

Теперь, представив положительные и отрицательные части как две отдельные функции, рис. 2в, снова подвергнем их обработке по алгоритмам (6) и (7). Результаты вычислений по формулам (6) и (7) идентичны и очевидны, рис. 2г.

Приведенный пример относится к точечному объекту. Аналогично можно определить глубину залегания распределенного объекта. Поскольку

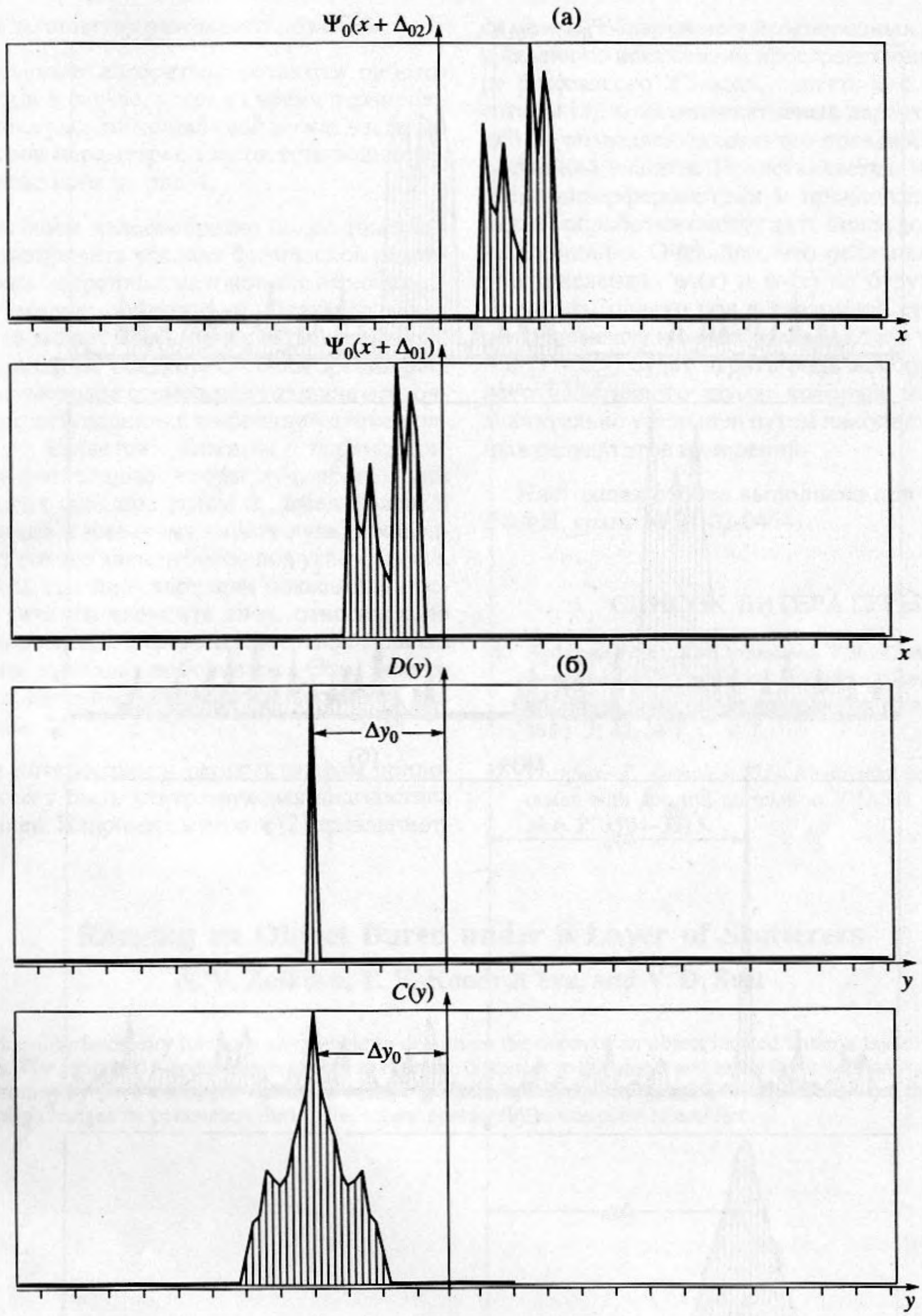

Рис. 3. а – фазовая функция распределенного объекта: $\psi_0(x + \Delta_{01})$ – смещенная на Δy_c и взятая с обратным знаком отрицательная часть разности (8); $\psi_0(x + \Delta_{02})$ – положительная часть разности (8). б – функционалы Div(y) и Covar(y), вычисленные от функций, показанных на рис. 3а. Угол $\Delta\alpha$ больше предыдущего.

размер объекта обычно неизвестен, то для того, чтобы функции $\psi_0(x + \Delta_{01})$ и $\psi_0(x + \Delta_{02})$ не перекрывались по оси X, необходимо подбирать угол $\Delta\alpha$ таким, чтобы функции (6) и (7) имели единственный максимум. Именно поэтому необходимо, чтобы объект имел достаточно малые угловые размеры. На рис. 3а показан соответствующий пример, где $\psi_0(x)$ представляет собой отрезок со случайным распределением фазы. На рис. 3б показаны окончательные результаты определения

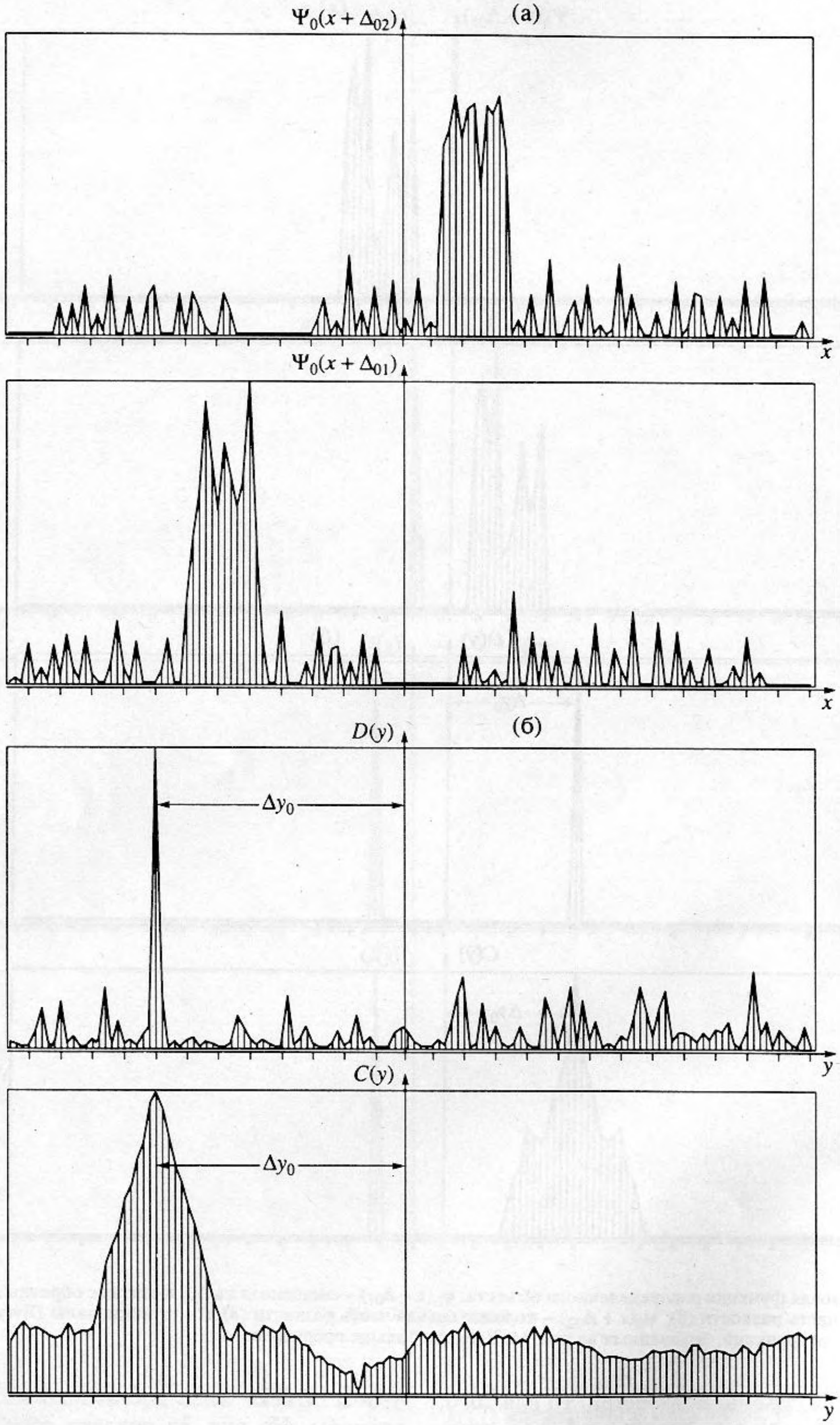

Рис. 4. а – фазовая функция распределенного объекта, полученная в условиях, когда за время перемещения источника параметры слоя $\psi_c(x)$ частично изменились. б – функционалы Div(y) и Covar(y), вычисленные от функций, показанных на рис. 3а. Угол $\Delta\alpha$ еще раз увеличен.

глубины залегания протяженного объекта.

Предлагаемые алгоритмы остаются работоспособными и в случае, когда за время перемещения источника рассеивающий слой может частично изменить свои параметры. Соответствующие результаты показаны на рис. 4.

В дальнейшем целесообразно более тщательно проанализировать условия физической реализуемости рассмотренных методов для их конкретных практических приложений. Одним из таких приложений может быть поиск объектов, находящихся под слоем осадков. С точки зрения рассмотренных методов возможная толщина осадочного слоя по отношению к выбранной длине волны звука является важным параметров. Поскольку необходимо, чтобы луч, прошедший через элемент слоя под углом α_1, имел фазовый набег, близкий к фазовому набегу луча, прошедшего через тот же элемент слоя под углом α_2, т.е. $\Delta\alpha h \Delta n < \lambda/2$, где Δn – вариация показателя преломления данного элемента слоя, относительно среднего значения n в среде и изменения угла $\Delta\alpha$ желательно сделать небольшим. Это можно обеспечить, например, сканируя поверхность дна узким лучом.

Другим интересным и перспективным приложением может быть ультразвуковая диагностика мягких тканей. Например, в работе [2] предлагаются методы обнаружения неоднородных включений в печени по искажениям пространственного спектра рассеянного УЗ-поля, однако, как указывают авторы [2], мультипликативный характер искажений не позволяет однозначно локализовать интересующий участок. Представляется, что методы спекл-интерферометрии и предложенные алгоритмы обработки смогут дать более достоверную информацию. Очевидно, что реальные фазовые распределения $\psi_1(x)$ и $\psi_2(x)$ не будут идеально совпадать, однако при достаточной степени корреляции между ними их разность $\Delta\psi = \psi_c(x + \Delta_{c1}) - \psi_c(x + \Delta_{c2})$ будет играть роль некоррелированного аддитивного шума, который может быть значительно уменьшен путем накопления отдельных результатов измерений.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 94-02-04541.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зуйкова Н.В., Кондратьева Т.В., Свет В.Д.* Применение методов спекл-интерферометрии в некоторых задачах акустики океана // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 1. С. 1–7.

2. *Varghese T., Donohue K.D.* Mean-scattrer spacing estimates with spectral correlation // JASA. 1994. V. 96. № 6. P. 3504–3515.

Ranging an Object Bured under a Layer of Scatterers

N. V. Zuikova, T. V. Kondrat'eva, and V. D. Svet

Speckle-interferometry methods are applied to determine the depth of an object located under a layer of scatterers. The proposed algorithms are shown to estimate distances to the object and to the layer with an accuracy, determined by the wavelength size of the receiving antenna. The algorithms are also applicable when the layer partially changes its parameters during the source passage from one point to another.