АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 2, с. 225 - 231

УДК 681.7:534.883

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ АКУСТИКИ ОКЕАНА

© 1996 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 22.12.94 г.

Рассмотрены возможные применения методов спекл-интерферометрии для измерения углового перемещения источника звука в среде с сильным рассеянием и в неоднородном волноводе. Проведено численное моделирование некоторых известных методов и предложен новый алгоритм измерения перемещения, основанный на оценке отношения Фурье-образов двух угловых спектров сигналов от источника в различные моменты времени. Показано, что при выполнении определенных условий многомодовый спектр можно рассматривать как спекл-структуру и однозначно измерять угловое смещение источника в волноводе с разрешающей способностью антенны, не прибегая к согласованной обработке.

Большинство современных методов решения обратных задач по оценке параметров источников звука, расположенных в волноводах и средах с рассеянием, основано на согласованной пространственно-временной обработке полей [1]. Такая обработка базируется на априорном вычислении или измерении функции Грина (передаточной характеристики канала), на основе которой в дальнейшем выполняется корреляционная обработка принятых сигналов. С физической точки зрения согласованная обработка реализует один из методов обращения и восстановления волнового фронта и по сути своей является голографической. Однако в отличие от оптики восстановление акустического источника осуществляется не в исходной физической среде, а цифровыми или аналоговыми средствами. Как и всем когерентным методам, использующим обработку сигналов по несущей частоте с точностью "до фазы", согласованным методам свойственен ряд ограничений. Главное из них – очень высокая чувствительность к амплитудно-фазовым флуктуациям сигналов из-за рассеяния на случайных неоднородностях среды. Даже при отсутствии аддитивного шума наличие сильных флуктуаций может сделать невозможной согласованную обработку из-за разрушения когерентности сигналов.

Более двадцати лет тому назад в оптике появился новый подход к решению некоторых обратных задач в средах с сильным рассеянием, основанный на идее использования корреляции флуктуаций рассеянного поля. Группа методов, объединенная этим подходом, получила название "спекл-голографии" и "спекл-интерферометрии" [2].

Амплитудно-фазовые флуктуации сигналов всегда рассматривались специалистами как помехи, причем часто мультипликативные, поэтому сама идея использования такой "помехи" для улучшения качества изображения и измерений оказалась достаточно революционной и не сразу была воспринята специалистами.

Интересно отметить, что в акустике океана аналогичные идеи спекл-интерферометрии гораздо раньше, чем в оптике, были высказаны в работе Ю.П. Лысанова [3] и развиты в его последующих работах с сотрудниками [4, 5]. Хотя сами авторы не использовали подобную терминологию и в то время не могли быть знакомы с оптикой спеклов, предложенные ими методы прецизионного измерения скорости и смещений источника звука основаны на оценках параметров корреляции флуктуаций рассеянного звукового поля неоднородностями дна, т. е. источником полезной информации о параметрах движения являются именно случайные флуктуации сигналов, [4, 5].

Привлекательность методов спекл-голографии для акустики океана связана с несколькими обстоятельствами. Прежде всего разнообразие масштабов неоднородностей в океане позволяет применять эти методы для измерения параметров движения точечных и распределенных источников в самых различных задачах: от глобальной томографии до исследований микроструктуры. Причем измерения смещений и скорости движения источника могут быть осуществлены с очень высокими точностями [5], которые труднодостижимы традиционными локационными методами. Кроме того, как мы увидим ниже, спекл-интерферометрические методы оперируют не с мгновенными значениями амплитудно-фазовых распределений полей, а с их интенсивностями, что значительно снижает требования к производительности средств обработки.

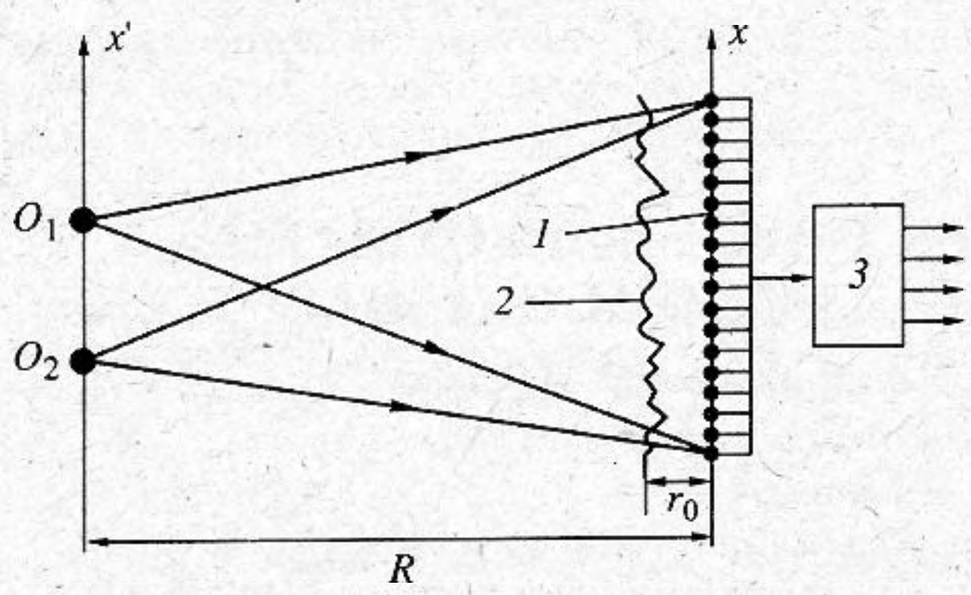

Рис. 1. Схема эксперимента. *1* – антенная решетка, *2* – слой неоднородностей, *3* – компенсатор.

В настоящей работе мы проиллюстрируем некоторые возможности спекл-интерферометрии на двух примерах. Сначала мы рассмотрим возможность измерения параметров движущегося источника в среде с сильным рассеянием, но эффектами многолучевости пренебрежем. Этот случай типичен для высокочастотного звуковидения в среде с сильным рассеянием. Во втором примере мы покажем каким образом можно оценить угловые смещения точечного источника звука в многомодовом океаническом волноводе, рассматривая угловой спектр мод как своеобразную спекл-структуру. При этом рассеяние на неоднородностях не рассматривается, но может быть впоследствии учтено.

1. СРЕДА С СИЛЬНЫМ РАССЕЯНИЕМ

Расположим в безграничном водном слое (рис. 1) точечный источник звука "O" с частотой f и приемную линейную антенну с N приемниками и длиной L. Расстояние между приемниками примем $\Delta = \lambda/2$. Пусть источник звука "O" располагается в дальней волновой зоне антенны на расстоянии $R \gg \dfrac{2L^2}{\lambda}$ и перемещается с некоторой скоростью из точки O_1 в точку O_2, для простоты параллельно антенне. Будем также полагать, что на антенне сформирован статический веер характеристик направленности либо с помощью стандартного компенсатора, либо с помощью акустической линзы. В последнем случае она располагается перед антенной решеткой на расстоянии, равном фокусу линзы. С точки зрения алгоритма обработки оба устройства эквивалентны и выполняют пространственное преобразование Фурье от падающего поля. Неоднородную среду можно представить в виде слоя рассеивателей или слоя прозрачных структур, вносящих фазовые искажения $\psi(x)$, значения которых могут составлять 2π и более. Расстояние от этого слоя до антенны обозначим через r_0. Если на длине антенны "укладывается" много интервалов пространственной корреляции функции $\psi(x)$, то при прохождении плоской волны от источника звука через слой $\psi(x)$ падающий фронт волны на антенну искажается настолько, что информация об источнике и его угловом положении будет полностью потеряна при обычной Фурье-обработке (рис. 2а, 2б).

Пусть $P(x) = A(x)\exp\{jk\varphi(x)\}$ – исходное поле от источника, тогда после прохождения через рассеивающий слой $\psi(x)$ и преобразования Фурье, полученный угловой спектр $\Phi(y)$ можно записать как

$$\Phi(y) = F_y[P(x)\exp\{jk\psi(x)\}], \tag{1}$$

где F_y – оператор Фурье, x – координата антенны. Сформируем теперь новую функцию $I(y)$, равную

$$I(y) = |\Phi(y)|^2, \tag{2}$$

и зарегистрируем в последовательные моменты времени $I_1(y)$ и $I_2(y)$. За время $\Delta t = t_2 - t_1$ источник передвинется из точки O_1 в точку O_2 на величину углового сдвига.

Теперь предположим, что за время Δt фазовая структура слоя не изменилась, т.е. $\psi(x, t_1) = \psi(x, t_2)$. Просуммируем $I_1(y)$ и $I_2(y)$ и возьмем снова преобразование Фурье от этой суммы. Оставляя промежуточные выкладки, легко показать, что в этом случае $|\Phi_1(y)| = |\Phi_2(y + \Delta y)|$, и так как $F_u[\Phi_2(y + \Delta y)] = F_u[\Phi_1(y)]\exp(j\Delta y u)$, то

$$\begin{aligned} |G(u)| &= |F_u[I_1(y) + I_2(y)]| = \\ &= |F_u[I_1(y)]|\,\{2[1 + \cos(\Delta y u)]\}^{1/2}, \end{aligned} \tag{3}$$

и $$|G(u)|^2 = 2|F_u[I_1(y)]|^2[1 + \cos(\Delta y u)]. \tag{4}$$

Функция (3) промодулирована косинусоидой с частотой Δy, пропорциональной угловому сдвигу источника α, который и требовалось измерить.

Описанная процедура реализует один из методов спекл-интерферометрии, впервые предложенный Лабейри, [2]. Для двумерного случая (плоская антенная решетка) появляющиеся периодические структуры (3) являются обычными полосами Юнга в оптике. На рис. 2а, 2б показаны угловые спектры $I_1(y)$ и $I_2(y) = I_1(y + \Delta y)$ и результат обработки по формуле (3), рис. 2в. Видно, что пространственный спектр спекл-структуры промодулирован периодической функцией. Число полуволн точно равно заданному угловому смещению источника.

При приеме поля на линейную антенну алгоритм (3) позволяет измерить только величину проекции перемещения источника на ось x. При двумерной антенной решетке, подобно используемой в линзовом звуковизоре, можно с помощью (3)

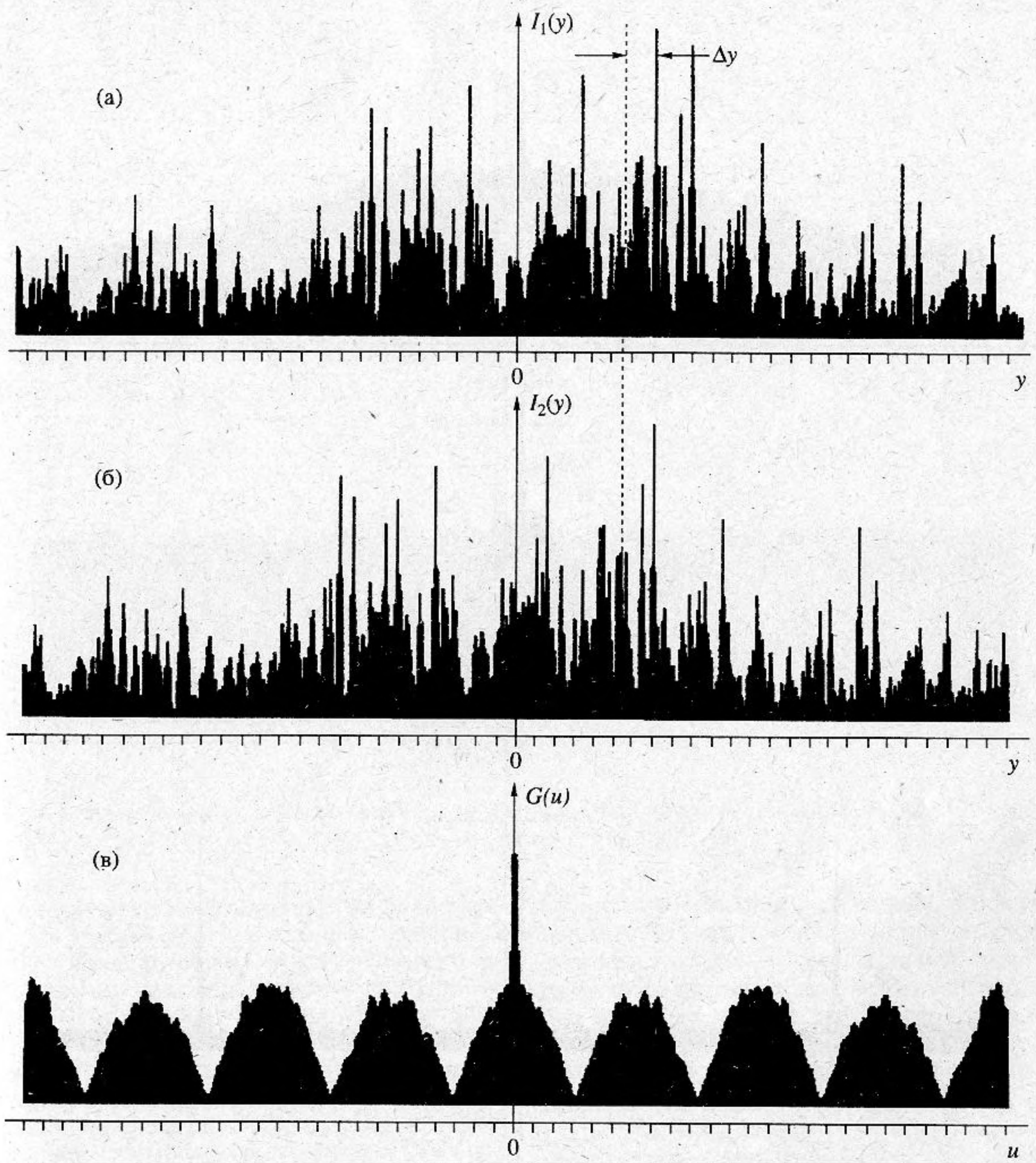

Рис. 2. Спектры принятого сигнала. а – спектр $I_1(y)$, б – спектр $I_2(y) = I_1(y + \Delta y)$, в – спектр суммы I_1 и I_2: $|G(u)| = |F_u[I_1(y) + I_2(y)]|$.

измерить и угловую ориентацию источника по углу наклона интерференционных полос[1].

Используя взаимокорреляционную обработку функции $I_1(y)$ и $I_2(y)$, "Covar$\{I_1 I_2\}$", вместо обработки (3) можно помимо величины сдвига оценить и его знак относительно нормали к антенне[2]. Соответствующие результаты показаны на рис. 3а - 3в. Если пространственный спектр фазовой функции $\psi(x)$ близок к равномерному и на антенне укладывается большое число интервалов пространственной корреляции функции $\psi(x)$, то корреляционная обработка дает хорошие результаты. Однако если в пространственном спектре $\psi(x)$ появляются квазипериодические составляющие, т.е. в фазовой структуре неоднородностей присутствует некоторая регулярность, то корреляционный метод сравнения может оказаться неоднозначным. Этот пример показан на рис. 3в, где за

[1] При этом все Фурье-преобразования становятся двумерными.

[2] В оптике этот метод получил название "корреляционной спекл-интерферометрии".

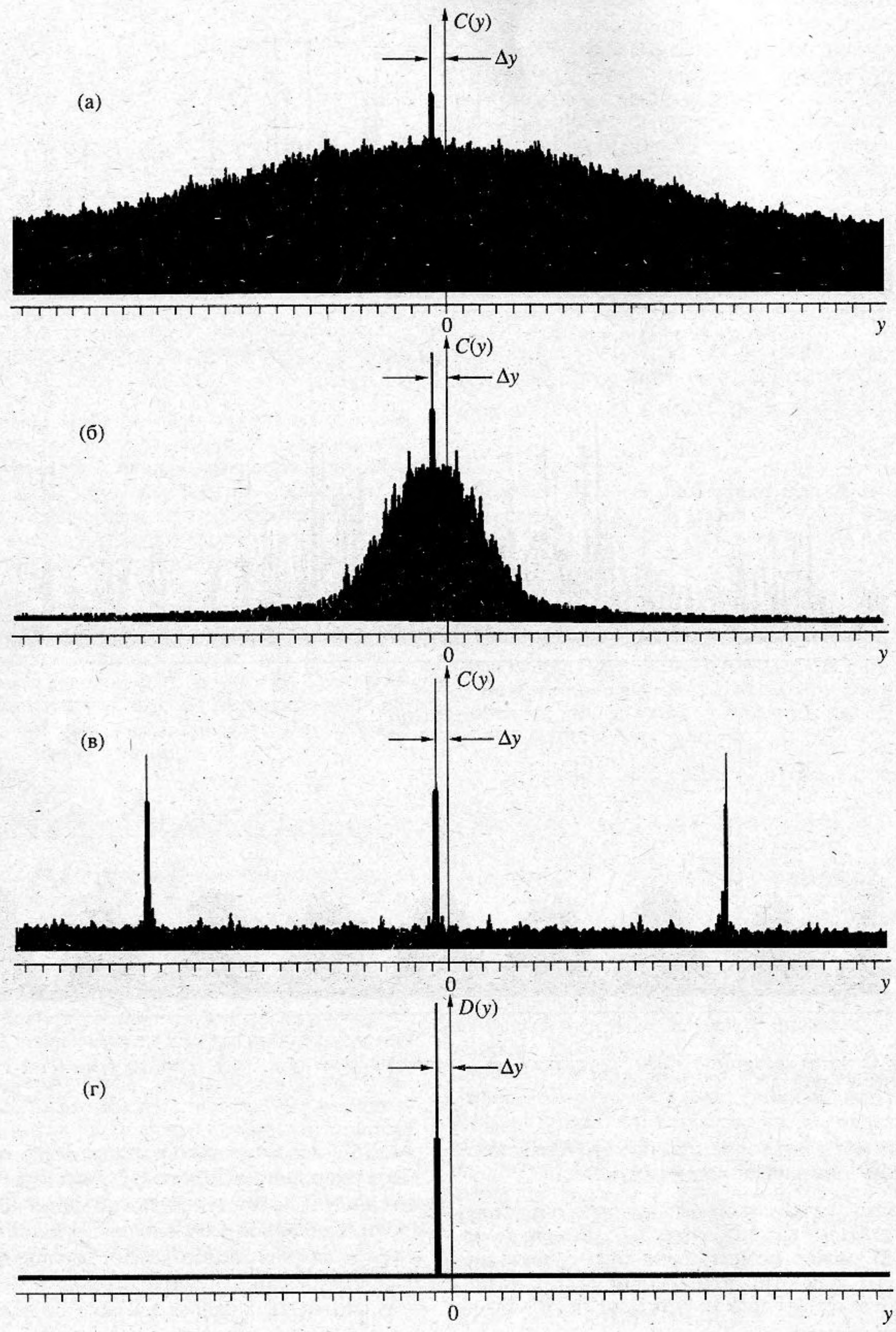

Рис. 3. Функции Covar$\{I_1 I_2\}$ и Div$\{I_1 I_2\}$ при $\psi(x, t_1) = \psi(x, t_2)$, а – функция Covar$\{I_1 I_2\}$, значения $\psi(x_i)$ меняются в каждой точке случайным образом от 0 до 2π, б – функция Covar$\{I_1 I_2\}$, значения $\psi(x_i)$ меняются через 5λ от 0 до 2π, в – функция Covar$\{I_1 I_2\}$, значения $\psi(x_i)$ меняются через $\lambda/2$ от 0 до 2π, но каждое третье значение равно нулю, г – функция Div$\{I_1 I_2\}$ для всех трех случаев (рис. 3а - 3в) одинакова.

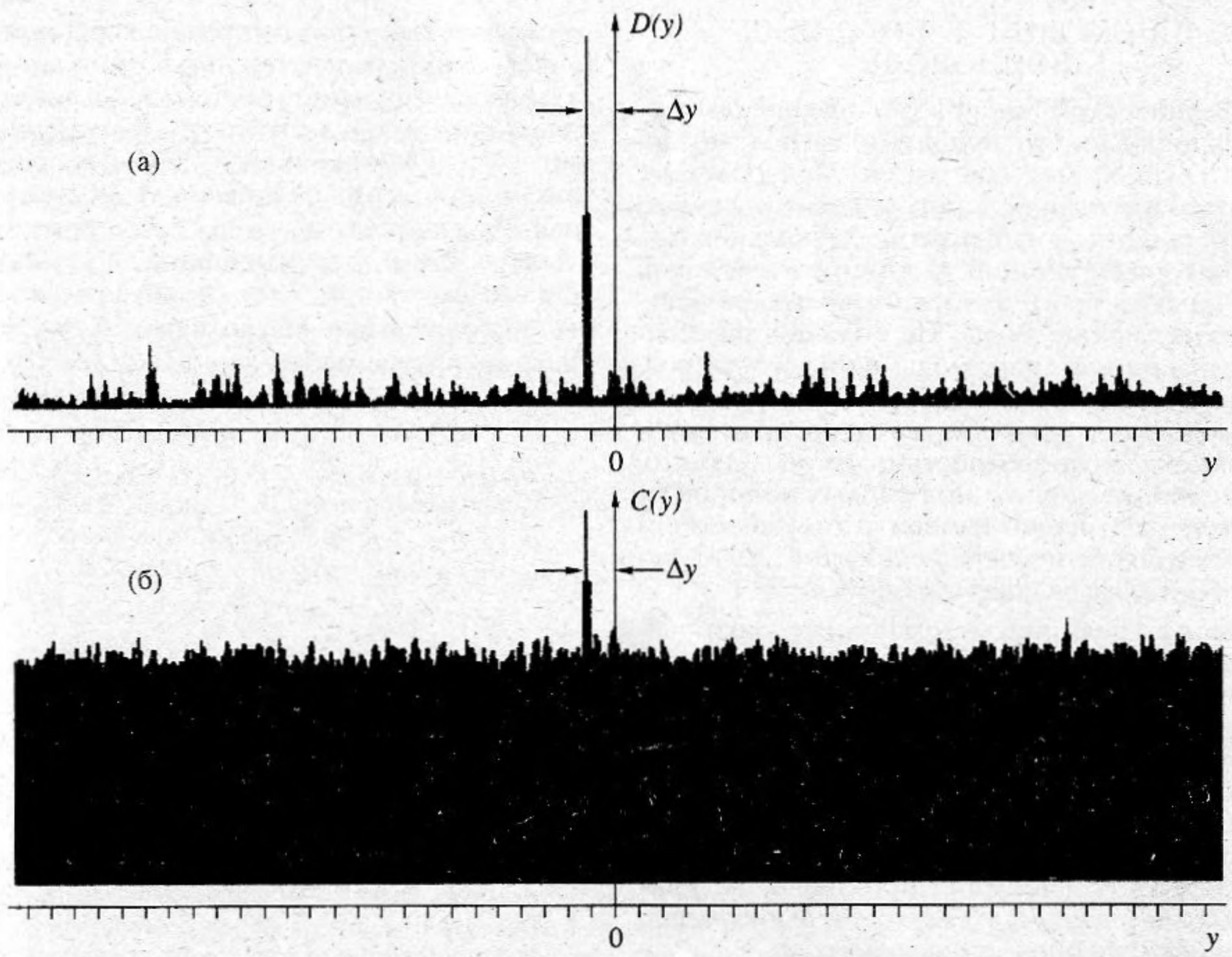

Рис. 4. Функция Covar$\{I_1 I_2\}$ и Div$\{I_1 I_2\}$ при $\psi(x, t_1) = \psi(x, t_2)$, $r_0 \neq 0$. а – функция Div$\{I_1 I_2\}$, б – функция Covar$\{I_1 I_2\}$.

счет периодического "обнуления" фазы в функции $\psi(x)$, в каждом третьем элементе антенны, в корреляционной функции Covar$\{I_1 I_2\}$ помимо полезного максимума появляются дополнительные, сравнимые по величине с основным и вносящие неоднозначность.

В связи с этим рассмотрим другой возможный алгоритм измерения смещения двух действительных функций относительно друг друга, который мы назовем алгоритмом деления, "Division". Вычислим преобразование Фурье от (2) до их суммирования, т.е. снова переведем сдвиг в фазовый наклон

$$\Lambda_1 = F_\eta\,[|\Phi_1(y)|^2],$$
$$\Lambda_2 = F_\eta\,[|\Phi_2(y)|^2] \qquad (5)$$

и сформируем отношение $B(\eta)$, из которого легко получить, что

$$B(\eta) = \frac{\Lambda_1(\eta)}{\Lambda_2(\eta)} = \exp(j\Delta\xi\eta). \qquad (6)$$

Обратное Фурье-преобразование дает

$$\mathrm{Div}(y) = F^{-1}[B(\eta)] = \delta(y - \Delta y), \qquad (7)$$

т.е. единственный пик, не зависящий от вида функции $\psi(x)$, если $\psi(x, t_1) = \psi(x, t_2)$. Соответствующие результаты показаны на рис. 3. Для всех трех случаев различного вида $\psi(x)$ функции Covar показанные на рис. 3а - 3в, различны, а функции Div одинакова и имеет единственный узкий максимум (рис. 3г). Алгоритм (7) дает лучшие результаты и в более сложных ситуациях, чем простая корреляция. На рис. 4а, 4б показаны результаты моделирования для случая, когда за время $\Delta t = t_1 - t_2$ рассеивающий слой частично изменил свои параметры и расположен не вблизи антенны, а на некотором расстоянии от нее. Если $\psi(x, t_1) = \psi(x, t_2)$, то по виду функции (7), рис. 4а, можно судить о положении слоя рассеивателей по глубине: энергия, рассеянная в функции (7), будет пропорциональна неперекрывающимся частям слоя. Этот эффект можно использовать для изучения рассеивающих слоев в таких областях, как УЗ-медицинская диагностика, геофизика и сейсморазведка, в которых положение слоев стабильно и информацию о них можно получить за счет смещения угла наклона освещающей волны от сканирующего источника звука.

2. ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК В ВОЛНОВОДЕ

В океаническом волноводе, идеальном или стратифицированном, принятый сигнал можно описать группой мод или лучей. При обычном фурье-преобразовании многомодового сигнала антенной решеткой, например вертикальной или большой горизонтальной, формируется угловой спектр (дискретный), который описывает бегущие, незатухающие моды. На больших расстояниях сохраняются лишь моды первых номеров, соответствующие небольшим углам выхода лучей, а моды более высоких номеров затухают и рассеиваются неоднородностями океана. Однако, и оставшиеся несколько мод первых номеров не позволяют однозначно измерить текущие координаты источника и для решения этой задачи используется согласованная обработка.

Основная идея, описываемая ниже, заключается в том, что при определенных предположениях возникающий модовый или угловой спектр лучей можно рассматривать как своеобразную спекл-структуру. Если при смещении источника эта спекл-структура не изменяет своего вида, то к ней применимы все методы спекл-интерферометрии, описанные в первой части и в этом случае можно измерить смещения источника, не прибегая к согласованной обработке и вычислению (измерению) функции Грина волновода.

Расположим в волноводе горизонтальную антенну на некотором расстоянии R от источника звука. Принятое поле на i-м приемнике можно записать в виде суммы бегущих мод

$$P(x_i) \sim \sum_{m=1}^{M} A_m \exp\,[j\xi_m(R + \alpha x_i)]\,, \tag{8}$$

где A_m – амплитуда m-й моды, $\xi_m = \dfrac{2\pi}{\lambda} a_m$ – горизонтальная составляющая волнового вектора, x_i – координата i-го приемника, α – направление на источник звука. Положим, что $a_m = 1 - b_m$, где b_m – малые добавки, но не вертикальные волновые числа: $b_m \ll 1$. Тогда (8) можно переписать в виде:

$$P(x_i) \sim \exp\,[jkR(1 + \alpha x_i)] \times \\ \times \sum_{m=1}^{M} A_m \exp\,[-jkb_m(R + \alpha x_i)]\,. \tag{9}$$

Из выражения (9) видно, что фазовый множитель перед суммой описывает плоскую волну, падающую на антенну под углом α.

При смещении источника к углу α' и расстоянию R' множитель в виде суммы в (9) изменит свой вид на $\sum_{m=1}^{M} A_m \exp\,[-jkb_m(R' + \alpha' x_i)]$. Однако если полагать, что фазовые множители в сумме (9) сохраняют свою фазу в пределах $\pi/2$ при замене α и R на α' и R' соответственно, то можно считать эту фазовую функцию постоянной и аналогом сохраняющейся спекл-структуры. Смещения источника по глубине волновода тоже должны быть такими, при которых значения A_m не меняют свой знак. Проанализируем более подробно при каких условиях это можно выполнить. Пусть сдвиг источника $\Delta\alpha = \alpha - \alpha' = \alpha_0$, где α_0 – угловое разрешение горизонтальной антенны, $\alpha_0 = \lambda/L$. Если шаг между приемниками равен $\lambda/2$, а число приемников равно N, то $\alpha_0 = 2/N$. По условию:

$$\frac{2\pi}{\lambda} b_m(R + \alpha x_i) - \frac{2\pi}{\lambda}\{R' + (\alpha + \alpha_0)\,x_i\} = \\ = \frac{2\pi}{\lambda} b_m(R - R') - \frac{2\pi}{\lambda} b_m \alpha_0 x_i \le \pi/2. \tag{10}$$

Пусть $x_i = x_{\max} = \dfrac{N\lambda}{2}$. Тогда с учетом, что $\alpha_0 = \dfrac{2}{N}$, (10) можно переписать в виде

$$\frac{2\pi}{\lambda} b_m(R - R') - \frac{2\pi}{\lambda} b_m \lambda = \\ = \frac{2\pi}{\lambda} b_m(\Delta R - \lambda) \le \pi/2. \tag{11}$$

Откуда допустимое изменение расстояния равно

$$\Delta R \le \frac{\lambda}{4b_m} + \lambda. \tag{12}$$

Учитывая, что для большинства океанических волноводов $b_m \simeq 10^{-2}$ - 10^{-3}, допустимые смещения по расстоянию могут составлять десятки и сотни длин волн. Например, при $\lambda = 3$ М, $L = 300$ М допустим сдвиг источника по расстоянию порядка 750 М. При этом фазовый множитель не будет изменять своего вида, что и требуется для реализации метода спекл-интерферометрии.

Для выделения перемещения далее над принятым полем (8) в различные моменты времени можно осуществить все те же преобразования (1), (2), (5), (6), (7), в результате которых мы получим узкий пик, подобный показанному на рис. 3г. Так же, как и в случае рассеивающей среды, время стабильности волновода должно быть больше, чем время перемещения источника на угол $\Delta\alpha$. В отличие от метода согласованной обработки описанный метод спекл-интерферометрии не позволяет когерентно сложить все моды, однако позволяет однозначно измерить угловое перемещение источника с разрешением, равным угловому разрешению антенны.

Таким образом, метод спекл-интерферометрии совмещает в себе первичную когерентную и последующую некогерентную обработку. Первое

преобразование Фурье (1) сохраняет фазовую информацию в интенсивности углового спектра. Операция (2), сохраняющая квадрат модуля углового спектра, уничтожает начальную фазу излучения и все общие для каждого приемника фазовые множители, включая exp(jkR). Однако информация об изменении угла прихода сохраняется в сдвиге функции (2) и последующие операции (5), (6) и (7) выделяют этот сдвиг.

В дальнейшем следует более детально проанализировать особенности спекл-интерферометрии в океанических волноводах и рассмотреть проблему помехоустойчивости этих методов к аддитивной помехе.

Авторы благодарят Д.А. Дементьева за полезные обсуждения в процессе работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зуйкова Н.В., Свет В.Д.* Согласованная обработка сигналов в океанических волноводах (обзор). // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 3. С. 389 - 403.
2. *Франсон М.* Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. С. 118.
3. *Лысанов Ю.П.* О временных флуктуациях звуковых сигналов, рассеянных на дне океана. // Акуст. журн. 1967. № 3. С. 401 - 406.
4. *Воловов В.И., Краснобородько В.В., Лысанов Ю.П., Сечкин В.А.* Новый акустический способ определения скорости судна. // Океанология. 1977. Т. 17. № 1. С. 158 - 163.
5. *Воловов В.И., Краснобородько В.В., Лысанов Ю.П., Сечкин В.А.* Определение курсовой скорости и бортового сноса судна относительно дна. // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 2. С. 293 - 295.

Application of Speckle Interferometry to Problems of Ocean Acoustics

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

Possible applications of speckle interferometry to measure angular displacements of a sound source in a medium with strong scattering and in an inhomogeneous ocean are considered. Some well known methods are numerically modeled, and an algorithm, based on the estimation of the ratio of the Fourier transforms of two angular spectra of source signals at different times, is compiled. It is demonstrated that, when certain conditions are met, the multimode spectrum may be viewed as a speckle structure, and the angular displacement of a source in a waveguide can be measured with the resolving power of the array without having recourse to matched filtering.