АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2005, том 51, № 4, с. 477–482

УДК 621.3/.535.2

# ОБРАЩЕНИЕ ВОЛН ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛОКАЦИИ НА ПРОСВЕТ

**© 2005 г. В. А. Зверев**

*Институт прикладной физики РАН*
*603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова 46*
*E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 27.08.2003 г.

Рассмотрены возможности импульсной акустической локации на просвет с использованием разделения во времени интенсивного прямого и слабого рассеянного сигналов, распространяющихся под малым углом друг к другу. Учтены два вида помех. Это нестационарные условия наблюдения, обусловленные влиянием течений, способствующих изменению времени прихода прямого и рассеянного сигналов, а также нестационарная реверберация. Показано, что в условиях рассмотренных помех применение корреляционного преобразования, эквивалентного временно́му обращению волн, обладает преимуществом сравнительно с традиционным методом локации, основанным на определении времени распространения сигнала.

Задача об обнаружении объектов по рассеянному ими излучению рассмотрена в ряде работ [1–6]. В [1] путем эксперимента в натурных условиях определяется минимальная сила цели рассеивателя, отделяемого от прямого сигнала с помощью многоэлементной антенны при непрерывном излучении. В [2, 3] решается та же задача с использованием смещения частоты рассеянного сигнала, обусловленного движением рассеивателя. В [4] предложен метод построения изображений рассеивателей, движущихся под слоем неоднородностей. В [5, 6] рассматривается импульсный режим локации. В [5] спектр импульсного сигнала выравнивается с расширением эффективной полосы частот с целью временно́го разделения прямого и рассеянного сигналов. В [6] ставится и решается задача обнаружения и определения координат рассеивателей с помощью сканируемых многоэлементных излучающей и приемной антенн в стационарных условиях и в свободном пространстве. В [6] при обработке сигналов с целью обнаружения рассеивателей и определения их координат применяется временно́е обращение волн (time-reversal) [7, 8]. Временно́е обращение волн позволяет устранять влияние неоднородностей среды на результат пространственной фокусировки сигналов в средах, содержащих случайные неоднородности, однако, вопреки утверждению, содержащемуся в [6], ничего не известно о возможности помехоустойчивого наблюдения рассеянных сигналов с помощью временно́го обращения волн. Из [6] тоже неясно, как следует применять временное обращение волн для помехоустойчивого выделения рассеянных сигналов, и каких результатов при этом можно достичь. Основное внимание авторы [6] уделяют пространственной разрешающей способности метода, оказывающейся весьма высокой в условиях стационарности задачи, однородной среды и полного отсутствия шумов и помех. Целью настоящей работы является исследовать эффективность временно́го обращения волн [7, 8] для выделения слабого рассеивателя при совокупном действии двух наиболее распространенных видах помех. К ним в первую очередь следует отнести временну́ю изменчивость скорости распространения волн и нестационарную реверберационную помеху.

Процедура временно́го обращения волн (time-reversed acoustics) состоит в обращении во времени принятого импульсного сигнала с последующей посылкой обращенного сигнала через ту же среду в обратном направлении. Результат временно́го обращения волн [7, 8] может быть представлен в виде свертки входного сигнала с корреляционной функцией двух откликов среды одного на короткий импульс в прямом направлении и второго на тот же импульс, посланный в обратном направлении. Успешное осуществление этого преобразования требует сохранения всех параметров исследуемой среды за все время опыта, включающего пробег волны как в прямом, так и в обратном направлении. Это необходимо для того, чтобы соответствующие сигналы были бы коррелированны между собой.

Временно́е обращение волн обеспечивает пространственную фокусировку обращенной волны, которая требует обязательного осуществления распространения обращенного во времени сигнала обратно. В то же время для нашей цели – выделения рассеянных сигналов – пространственная фокусировка вовсе не требуется. Для этой цели вполне достаточно принять обращенную волну в той точке, откуда она была излучена. В этом случае результат временно́го обращения может

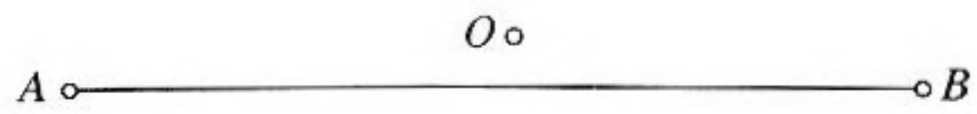


**Рис. 1.** Схема опыта, принятая в расчетах. В точке А помещен излучатель, в точке В расположен приемник. В точке О находится рассеиватель.

быть получен на основе однократного распространения волны из точки излучения в точку приема, так как в этом случае функция взаимной корреляции сводится к функции автокорреляции. Функцию автокорреляции отклика на входной сигнал можно получить на основе однократного пробега волны. Получающееся математическое выражение имеет небольшое, не имеющее принципиального значения, отличие от выражения для обращенной волны, принятой в точке излучения. Зато требование стационарности полностью снимается, что весьма существенно для акустики жидких и газообразных сред. В этом состоит основная идея достижения помехоустойчивости операции обращения волн по отношению к нестационарным условиям.

Методы расчетов и их результаты поясним на конкретном примере. Схема опыта показана на рис. 1. Импульсный сигнал излучается из точки А (рис. 1). Этот сигнал принимается в точке В. В точке О расположен рассеиватель, который следует обнаружить и измерить силу цели рассеивателя и время запаздывания рассеянного сигнала относительно прямого. Геометрическая разность хода $\Delta R$ между прямым и рассеянным сигналами, может быть оценена по формуле:

$$\Delta R = a^2/R, \tag{1}$$

где $a$ – наименьшее расстояние между точкой О (рис. 1) и линией АВ; $R$ – длина АВ. Формула (1) справедлива для достаточно больших расстояний $R$ сравнительно с $a$ и для положения точки О достаточно удаленного от концевых точек интервала АВ. Считается, что длительность импульса $\Delta t$ достаточно мала для того, чтобы прямой сигнал и рассеянный разделялись по времени прихода. Для этого необходимо, чтобы

$$\Delta t < \Delta R/c, \tag{2}$$

где $c$ – скорость распространения волн.

Для нашей цели – выяснения помехоустойчивости операции временнóго обращения волн – достаточно рассмотреть простейшую ситуацию, показанную на рис. 1. В общем случае рассеивателей может быть более одного, как это рассмотрено в [6]. Спектр сигнала, принятого в точке В будет:

$$G_B(\omega) = F(\omega)z(\omega). \tag{3}$$

Здесь $\omega$ – частота; $F(\omega)$ – спектр посланного короткого импульса; $z(\omega)$ – частотная характеристика тракта распространения волн между точками А, В. Частотная характеристика представляет собою отклик тракта на посылку предельно короткого импульса, обладающего единичной площадью ($\delta$-импульс). Для осуществления временнóго обращения волны следует излучить из точки приема сигнал, обращенный во времени. Спектр такого сигнала будет комплексно сопряженным. Спектр сигнала, принятого при этом в точке излучения, будет [8]:

$$G_A(\omega) = F^*(\omega)z^*(\omega)z(\omega). \tag{4}$$

Для осуществления действия, приводящего к получению спектра сигнала, описываемого (4), необходимы два последовательных шага [7]. Первого для получения спектра (3) и второго, состоящего в излучении обращенного во времени сигнала в ту же среду. В условиях нестационарности это сделать невозможно, так как среда изменяется. Однако можно воспользоваться уже имеющимся в точке В откликом на посланный из точки А импульс для того, чтобы получить спектр следующего сигнала:

$$K(\omega) = G_B^*(\omega)G_B(\omega) = F^*(\omega)z^*(\omega)F(\omega)z(\omega). \tag{5}$$

Сравним формулы (4) и (5). Они отличаются множителем, равным спектру посланного сигнала. Это отличие для нашей цели не является существенным. Поэтому мы будем считать, что преобразование (5), которое мы будем использовать для помехоустойчивого выделения рассеивателей, представляет собой по существу спектр результата временнóго обращения волн.

Теперь на численном примере покажем, что преобразование (5) обладает повышенной помехоустойчивостью по отношению к обычному локационному выделению рассеянного сигнала. Прежде всего, покажем, что формулы (5) достаточно для выделения рассеянного сигнала. Спектр сигнала, принятого в точке В, является суммой спектров прямого сигнала и рассеянного, имеющего форму прямого сигнала, задержанного относительно прямого сигнала на время, определяемое (3):

$$G_B(\omega) = F(\omega) + kF(\omega)\exp(i\omega\Delta t). \tag{6}$$

Здесь $k$ – величина ослабления рассеянного сигнала по отношению к прямому, определяемая силой цели рассеивателя. В общем случае $k$ является функцией $\omega$. Мы сначала для простоты предположим, что зависимости $k$ от $\omega$ нет. Это мы вправе сделать, так как зависимость $k$ от $\omega$ не влияет на рассматриваемую нами помехоустойчивость. Рассмотрев помехоустойчивость преобразования (5), мы вернемся к вопросу о зависимости $k$ от $\omega$. Общий множитель, определяющий ослаб-

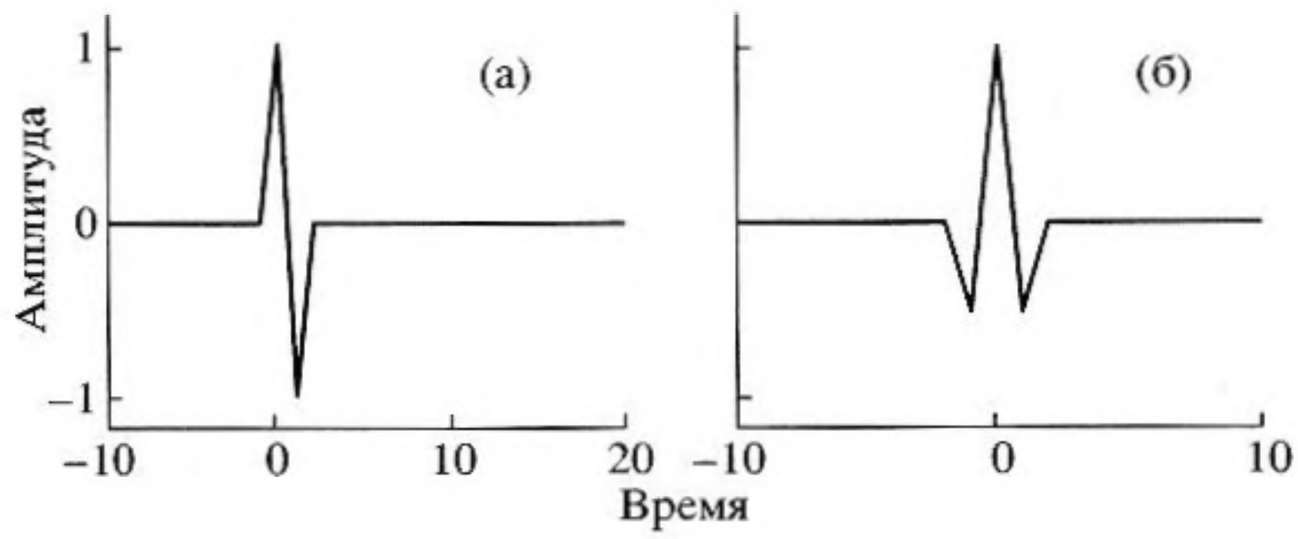


**Рис. 2.** Осциллограмма излученного импульса (а) и его автокорреляционная функция (б).

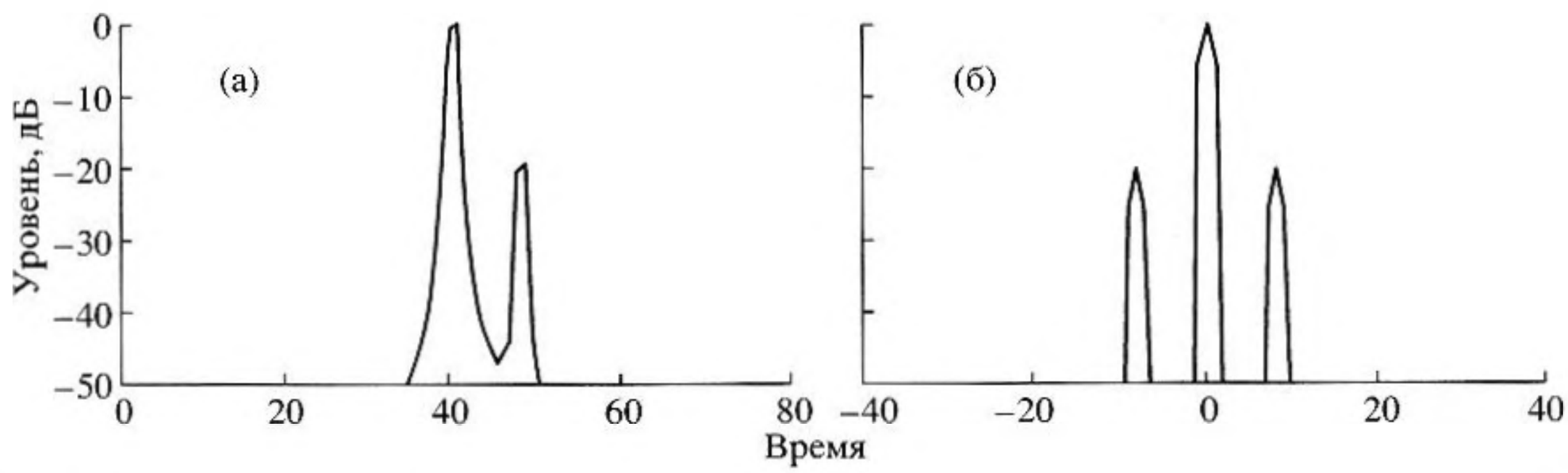


**Рис. 3.** Уровень (логарифм модуля) осциллограммы принятого сигнала (а) и уровень его автокорреляционной функции (б).

ление прямого и рассеянного сигналов на пути от А к В, опущен. Подставив (6) в (5), получим:

$$K(\omega) = F^*(\omega)F(\omega)(1 + kk^*) + \\ + F^*(\omega)F(\omega)\{k\exp(i\omega\Delta t) + k^*\exp(-i\omega\Delta t)\}. \quad (7)$$

Рассматриваемая нами задача имеет наибольший интерес для слабых рассеивателей, для которых квадратом модуля $k$ можно пренебречь сравнительно с единицей, что мы и будем предполагать. В этом приближении (7) обобщается на сумму ряда рассеивателей с сохранением аддитивности рассеивателей. Как видно из (7), преобразование (5), эквивалентное временно́му обращению волны, содержит члены с информацией как о величине рассеянного сигнала по отношению к прямому, так и о величине задержки сигнала. Эти члены задержаны относительно максимума прямого сигнала на то же самое время (3) и поэтому условия (2) вполне достаточно, чтобы они могли бы быть отдельно выделены и измерены.

На рис. 2а показана осциллограмма начального импульса. На рис. 2b показана автокорреляционная функция этого импульса. С помощью этих осциллограмм можно наглядно показать отличие между (4) и (5). И в том и другом случае на соответствующих осциллограммах будут повторяющиеся через время $\Delta t$ импульсы, однако форма этих импульсов будет различной. Формуле (4) соответствует импульс, показанный на рис. 2а, а формуле (5) – импульс, показанный на рис. 2б. На рис. 3 показаны уровни сигналов, принимаемых без помех с помощью обычной локации (рис. 3а) и с помощью корреляционного преобразования (5) (рис. 3б). Из этих рисунков следует, что оба метода позволяют определить как наличие рассеянного сигнала (или сигналов, если их несколько), так и их относительную величину по отношению к прямому сигналу (в данном случае это –20 дБ) и относительную задержку (8 единиц дистанции). Однако у картин, показанных на рис. 3а и рис. 3б различная чувствительность к изменению такого существенного параметра задачи, которым является общая задержка прямого и рассеянного сигналов. Действительно, если мы изменим величину общей задержки, то это будет заметно только на рис. 3а, а рис. 3б останется прежним. На этом основана помехоустойчивость корреляционного преобразования (5) по отношению к обычной локации.

Покажем это на конкретном примере. Введем сначала помеху, которую замечает лишь обычная локация. Пусть вследствие влияния течений, смещающих вихри и температурные неоднородности среды, общее время задержки изменяется со временем. Картина, соответствующая набору 16 моментов времени показана для обычной локации на рис. 4а. На этой картине хорошо видны как

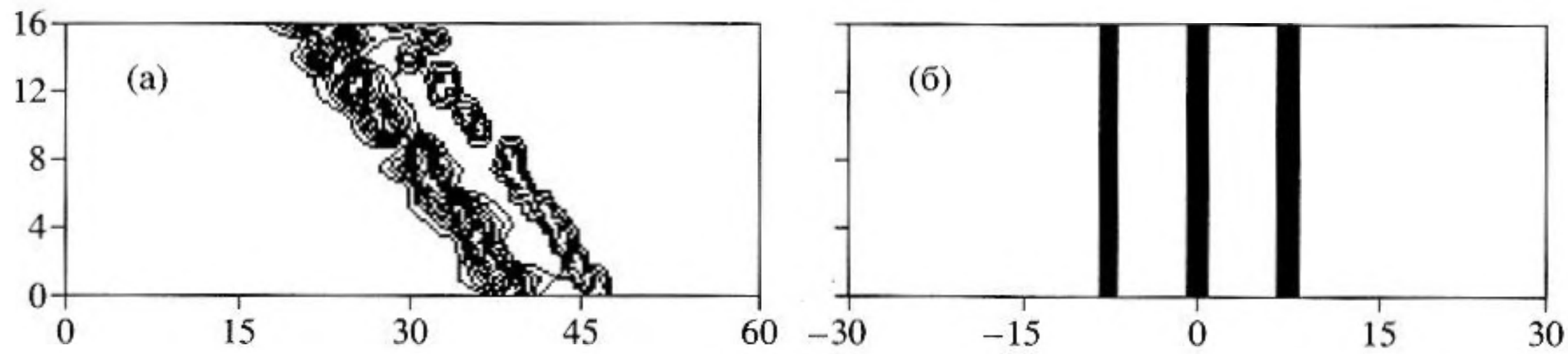


**Рис. 4.** Отклики локатора в виде функции времени (вертикаль) и задержки (горизонталь) для обычного локатора (а) и корреляционного (б), осуществляющего обработку сигнала согласно (5), при случайном изменении времени распространения сигнала.

прямой, так и рассеянный сигналы, совершающие общее движение в соответствии с изменением общей задержки со временем. Соответствующая тем же моментам времени картина, обработанная корреляционным способом (5) показана на рис. 4б. На этой картине наблюдается полнейшая стабильность. Осталось только воспользоваться этой стабильностью для получения преимущества в помехоустойчивости. Для этой цели добавим еще один вид помех, а именно, зависящую от времени реверберацию в виде набора посторонних рассеивателей. Каждый отдельный рассеиватель обладает ничтожной силой цели. Однако их так много, что их совокупное влияние становится заметным. Реверберация является пространственным аналогом дробового шума в электронике. Следствием случайного характера суммирования является то, что образующиеся максимумы изменяют свои величины и положения в пространстве случайным образом [9]. Это свойство реверберации (случайность положения и величины образующегося локального максимума) мы положили в основу математического моделирования реверберации. Примеры именно таких рассеивателей, наблюденные экспериментально в условиях поверхностной реверберации, приведены в [10, 11]. Из приведенных там примеров видно, что, несмотря на огромное число первичных рассеивателей, максимумов, создающих реальную помеху локации, формируется немного. Это было учтено при моделировании.

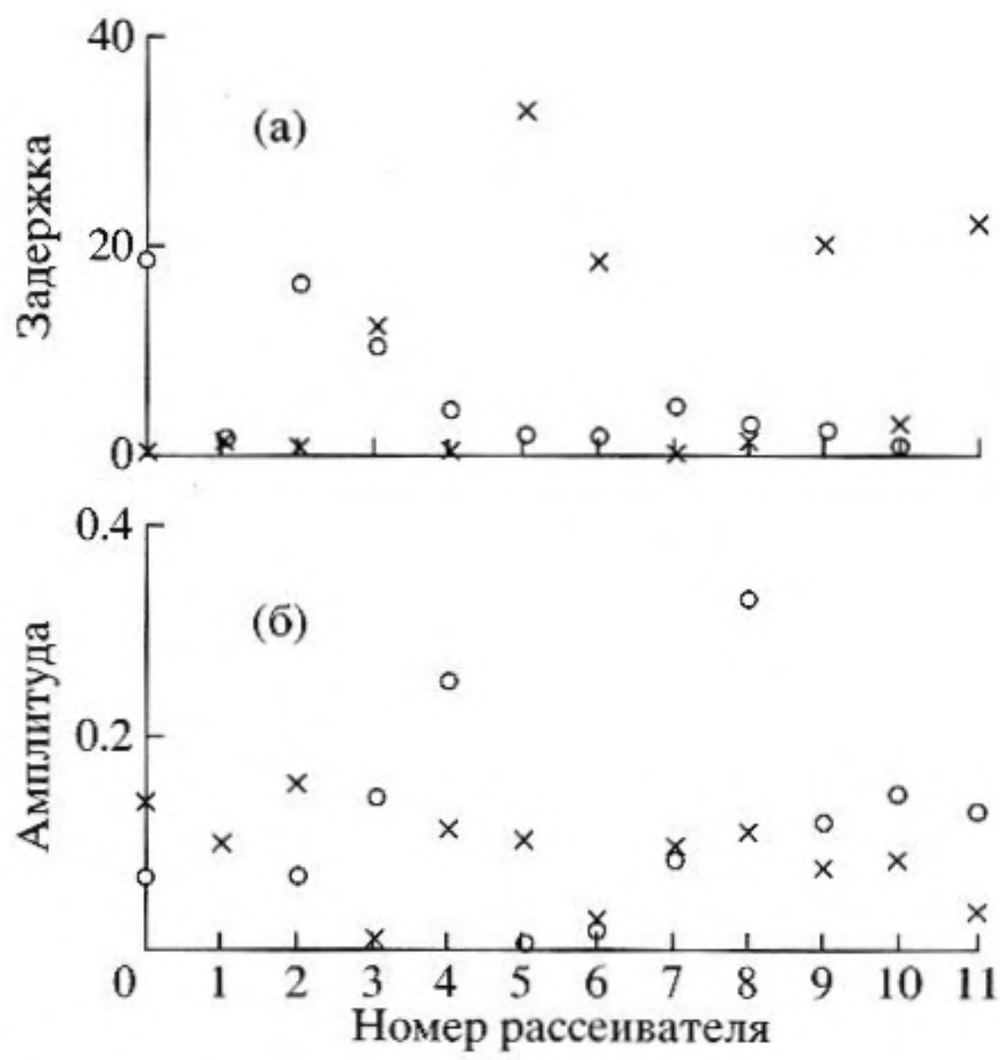


**Рис. 5.** Задержки (а) и амплитуды сигналов (б) , рассеянных рассеивателями для двух (из 16) моментов времени. Значения, относящиеся к одному моменту, помечены крестиком, а к другому кружочком.

С помощью случайных последовательностей, генерируемых компьютером, были сформированы таблицы случайных чисел, которые определяли положение (задержку относительно прямого сигнала) и амплитуду 12 рассеивателей для каждого из 16 моментов времени. На рис. 5а приведены положения рассеивателей в 2 момента времени, а на рис. 5б их амплитуды. На графике 5а показаны разности хода между прямым сигналом и рассеянным. Эти разности хода вычислялись по формуле (1) по взятым из таблицы случайных чисел положениям рассеивателей. Для моделирования реверберационной помехи использованы два набора рассеивателей, отличающихся амплитудами в 3 раза (10 дБ).

Результаты добавления реверберационной помехи показаны на рис. 6. Из этого рисунка видна помехоустойчивость корреляционного преобразования (5) сравнительно с обычным локационным наблюдением. Если на рис. 6а1 при относительно слабой реверберации еще можно сказать, что задержанный сигнал просматривается, то на рис. 6а2 при увеличенной реверберации задержанный сигнал не просматривается совсем. В то время как на рис. 6б1 и даже 6б2 задержанный сигнал хорошо заметен. При дальнейшем увеличении реверберации задержанный сигнал быстро (всего через несколько дБ) пропадает и с этих картинок. На рис. 6б1 сигнал реверберации в большинстве еще меньше амплитуды задержанного сигнала, искаженного наложением реверберации, а на рис. 6б2 сигнал реверберации (в большинстве импульсов) сравним или даже превыша-

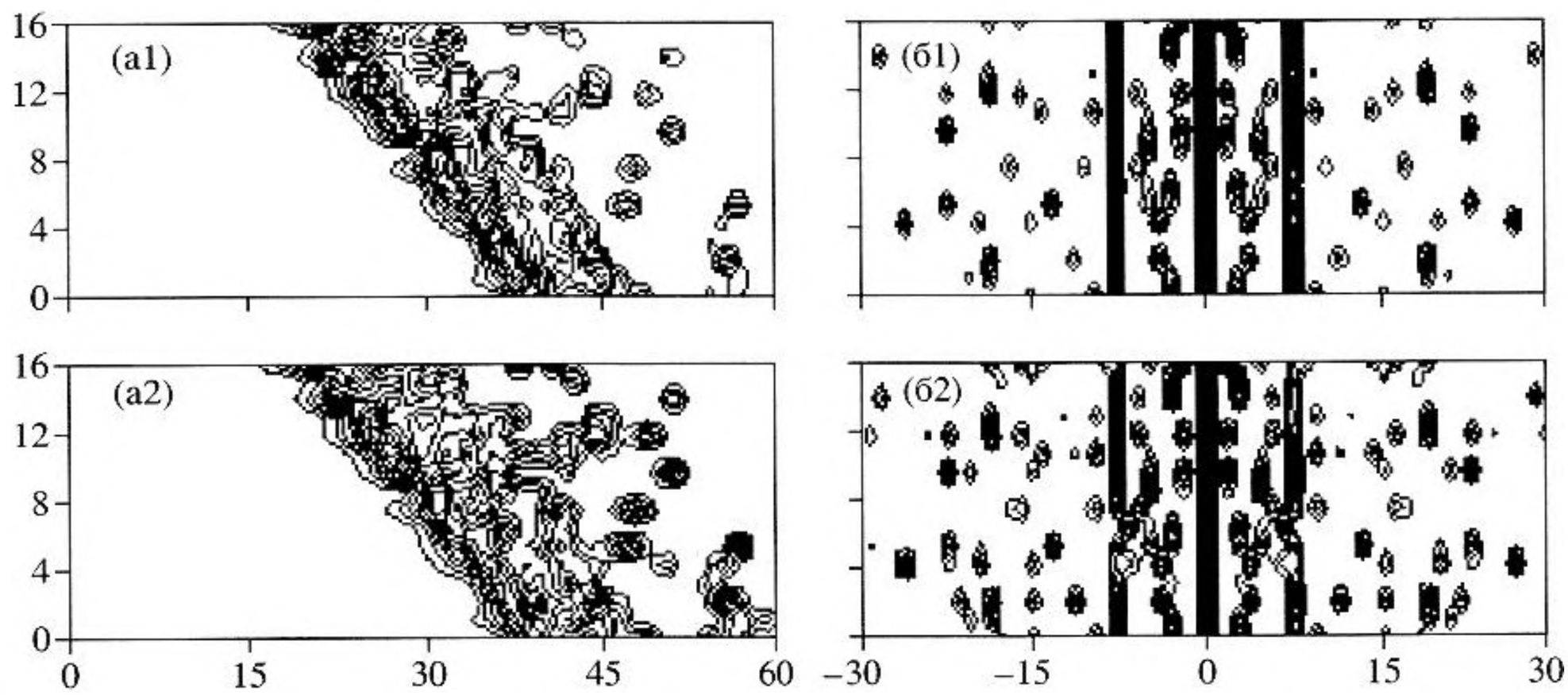


**Рис. 6.** Отклики локатора в виде функции времени (вертикаль) и задержки (горизонталь) для обычного локатора (а) и корреляционного (б), осуществляющего обработку сигнала согласно (5), при случайном изменении времени распространения сигнала и 2 уровнях ревеберации (малом (1) и увеличенным на 10 дБ (2)).

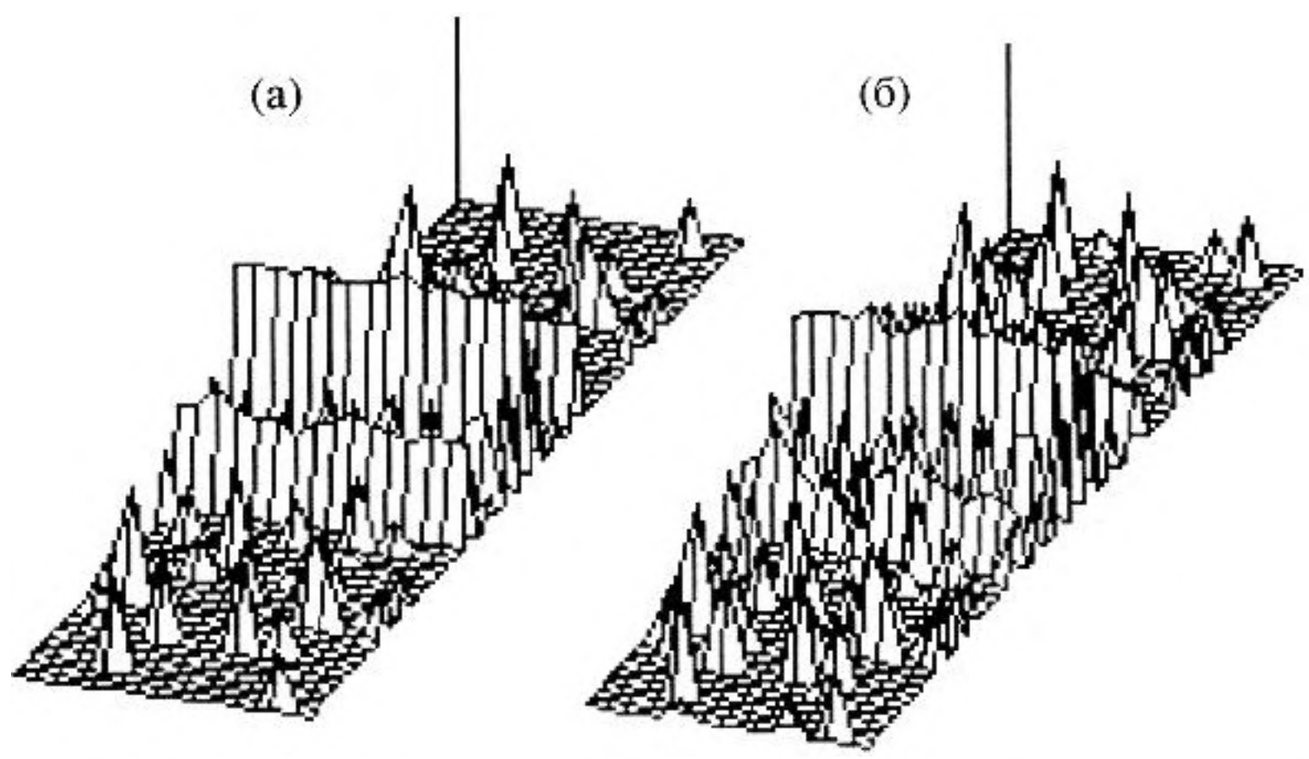


**Рис. 7.** Логарифмы положительных значений откликов локатора в виде функции времени (горизонталь) и задержки (глубина) для корреляционного локатора, осуществляющего обработку сигнала согласно (5), при случайном изменении времени распространения сигнала и 2 уровнях реверберации (малом (а) и увеличенным на 10 дБ (б)).

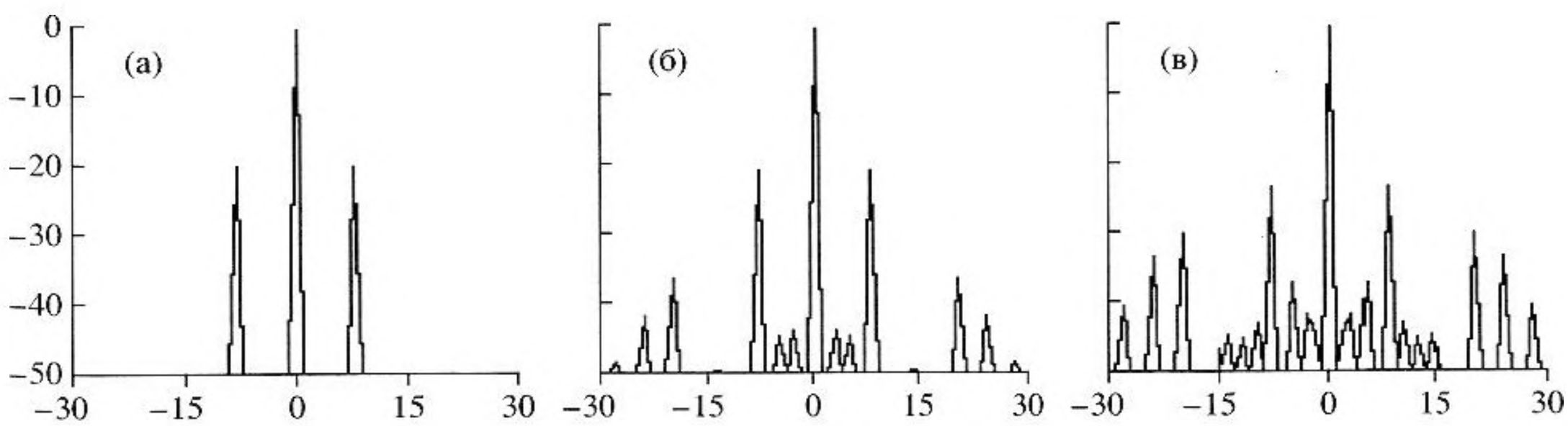


**Рис. 8** . Амплитуды положительных значений сигналов накопленных за 16 моментов времени в корреляционном канале. В отсутствии реверберации (а), при слабой реверберации (б) и реверберации, увеличенной на 10 дБ (в). Вдоль вертикали отложены уровни сигналов в дБ, вдоль горизонтали время.

ет амплитуду сигнала рассеивателя. Это видно из рис. 7, на котором показаны рис. 6б1 и рис. 6б2 в амплитудном виде. Несмотря на то, что искомый сигнал на рис. 6б2 не превосходит реверберацию, он на рис. 6б2 хорошо виден благодаря эффекту накопления. Возможность накопления обеспечивает стабильность положения искомого сигнала, которая появляется благодаря корреляционной обработке (5).

Стабильность положения сигнала во времени позволяет получить преимущество и при сложении сигналов во времени (временно́м накоплении). Результат временно́го накопления показан на рис. 8. Из этого рисунка видно, что накопленный сигнал во всех случаях превышает сигнал реверберации.

Конкретная величина достигаемой помехоустойчивости за счет временно́го обращения волны определяется многими факторами, в обсуждение которых мы не видим необходимости вдаваться. Для нас существенным и достаточным результатом является обратить внимание на возможность получения дополнительной помехоустойчивости при обращении волн.

Теперь вернемся к зависимости коэффициента $k$ от $\omega$. Для определения зависимости $k$ от $\omega$ следует применять короткий импульс с высокочастотным заполнением, подобный импульсу, использованному в [6]. Такой импульс может быть сформирован таким образом, что его спектр можно считать локализованным в такой узкой полосе частот, что коэффициент $k$ можно будет считать постоянным в пределах спектра импульса. Для получения зависимости от частоты следует изменять частоту заполнения импульса и повторять измерения.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 02-02-17056) и грантом Минпромнауки (№ НШ-1641.2003.2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gershman A.B., Turchin V.I., Zverev V.A.* Experimental Results of Localization of Moving Underwater Signal by Adaptive Beamforming // IEEE Trans. on Signal Processing , vol. 43, № 10, October 1995, p. 2249–2257.
2. *Зверев В.А.* Акустическое темное поле // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 75–83.
3. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Салин Б.М., Турчин В.И.* Обращенный апертурный синтез в акустическом темном поле // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 650–657. Acoustical Physics. 2000. V. 46. № 5. P. 569–575.
4. *Зуйкова Н.В., Кондратьева Т.В., Свет В.Д.* Акустическое изображение объектов, движущихся под неоднородным слоем //Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 2. С. 183–193.
5. *Зверев В.А., Коротин П.И., Циберев А.В.* Интерференционная локация высокого разрешения // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 468–472.
6. *Sean K. Lehman, Anthony J. Devaney.* Transmission mode time-reversal super-resolution imaging. // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. № 5. P. 2742–2753.
7. *Mathias Fink, Didier Cassereau, Arnaud Derode, Claire Prada,* Philippe Roux, Mickael Tanter, Jean-Louis Thomas and Franë cois Wu. Time-reversed acoustics // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 1933–1995. Printed in the UK.
8. *Зверев В.А.* Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
9. *Сухаревский Ю.М.* Теория реверберации моря, обусловленная рассеянием звука. // Докл. АН СССР. 1947. Т. 55. № 9. С. 825–828.
10. *Зверев В.А., Коротин П.И.* О возможности благоприятного влияния поверхностной реверберации на выделение дифрагированного сигнала // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 3. С. 353–358.
11. *Зверев В.А., Коротин П.И.* Качественное отличие полезного сигнала от поверхностной реверберации при когерентном накоплении импульсов активной локации // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 1. С. 75–80.

# Reversal of Waves in Forward-Scattering Location

**V. A. Zverev**

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhni Novgorod, 603600 Russia*

*e-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru*

**Abstract**—Potentialities of the pulsed acoustic forward-scattering location with the use of the time separation of the intense direct and weak scattered signals propagating at a small angle to one another are considered. Two types of interference are taken into account: the nonstationary observation conditions under the effect of currents, which affect the arrival times of the direct and scattered signals, and the nonstationary reverberation. It is shown that, in the presence of these interferences, the application of the correlation transformation equivalent to the time reversal of waves has an advantage over the conventional location technique based on the determination of the signal travel times.