АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 6, с. 814–819

УДК 534

ОБРАЩЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛУЧЕВОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТ АКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ

© 2003 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 17.07.2002 г.

На примере идеального волновода показана возможность устранения влияния многолучевости на выделение объекта локации с помощью обращения волнового фронта.

В условиях многолучевого распространения сигналов выделение объектов локации становится затруднительным. Вместо ожидаемого отклика от объекта локации приходит сплошной гул, по которому трудно различить отражение от объекта локации на фоне случайных вариаций уровня сигнала. Формально многолучевость, в виде повторов сигнала и шума, не изменяет величину отношения сигнала к шуму. На этом основании может создаться впечатление, что многолучевая среда не должна существенно влиять на возможность обнаружения сигнала. Возможно, что это действительно так во многих важных случаях, однако есть довольно большой класс сигналов, для которых не столь важно отношение сигнала к шуму, как важна форма сигнала. К такому классу принадлежат сигналы активной локации. Активная локация эффективна при весьма малом отношении уровня полезного сигнала к уровню мешающего шума, если под уровнем сигнала и шума понимать их энергию, усредненную за одинаковое и достаточно большое время. Если узкий импульс, отраженный объектом локации, по амплитуде намного превосходит стандартное уклонение шума σ (корень квадратный из дисперсии за вычетом среднего значения), то такой импульс отчетливо наблюдается в присутствии шума, несмотря на то, что усредненная энергия в коротком импульсе много меньше усредненной энергии в мешающем непрерывном шуме.

Обнаружение сигнала в случае импульсной локации основано на заметности импульса на фоне шума. Однако это основное отличие сигнала от шума – заметность – в значительной мере утрачивается при распространении импульса в многолучевой среде. Продемонстрируем это на конкретном примере распространения сигнала в идеальном волноводе. Пусть имеется волновод с хорошо отражающими стенками, такими, что одиночный узкий зондирующий импульс приобретает вид, показанный на рис. 1.

Представим себе теперь, что в свободной среде результат локации выглядит так, как показано на рис. 2а или 2б. Шумовой фон может быть создан как наличием аддитивного шума, так и наличием отражений. Мы будем предполагать последний случай. В этом случае мы имеем дело с так называемой реверберационной помехой, характерной, например, для мелкого моря [1]. В случае, показанном на рис. 2, импульс, отраженный от объекта локации, отчетливо виден. Отношение среднего уровня сигнала к среднему уровню шума при усреднении за время показанной реализации на рис. 2а составляет минус 4 дБ. В то же время на этом же рисунке максимальное значение сигнала превышает σ почти на 19 дБ, в результате чего импульс отчетливо виден. На рис. 3 показано, как выглядят те же сигналы, показанные на рис. 2а, в условиях многолучевого распространения сигналов. Зондирующий сигнал локатора выглядит теперь так, как показано на рис. 1. Каждый отдельный импульс из показанных на рис. 2а теперь повторяется протяженным зондирующим сигналом. Как видно из рис. 3, в случае многолучевого распространения сигналов того превышения амплитуды сигнала, отраженного искомым объектом локации, которое было показано на рис. 2а, уже недостаточно. Для сравнения на рис. 3 показаны два случая. В одном из них полезный сигнал присутствует, а в другом нет. Как видно из рис. 3, эти случаи практически неразличимы, и принять решение о том, в каком из них есть искомый сигнал, а в каком он отсутствует, невозможно. На рис. 4 изображено то же самое, что и на рис. 3, но для уровня реверберации, показанного на рис. 2б, который на 20 дБ меньше. Отношение сигнала к шуму на этом рисунке, взятое по энергии, уже положительное – почти плюс 16 дБ. На рис. 4 видно, что сигнал присутствует только по его величине, но отнюдь не по его форме, которая имеет вид шумоподобного сигнала.

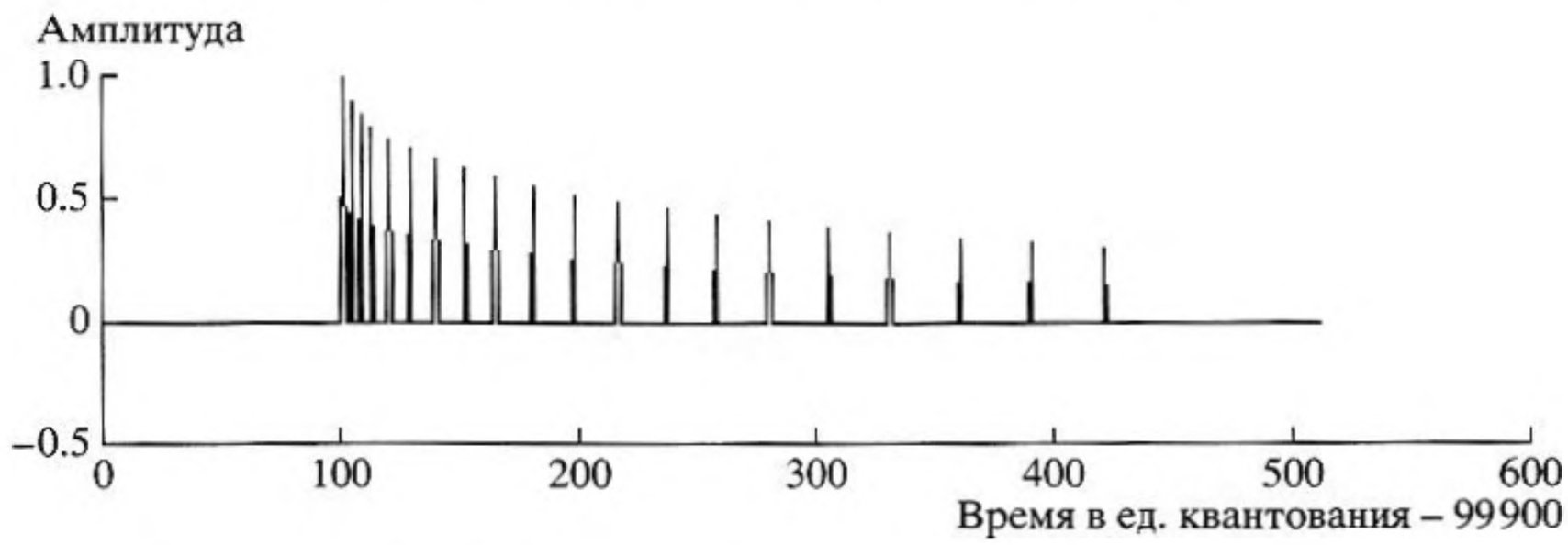

Рис. 1. Последовательность импульсов, отраженных от стенок идеального волновода, принятая в расчетах.

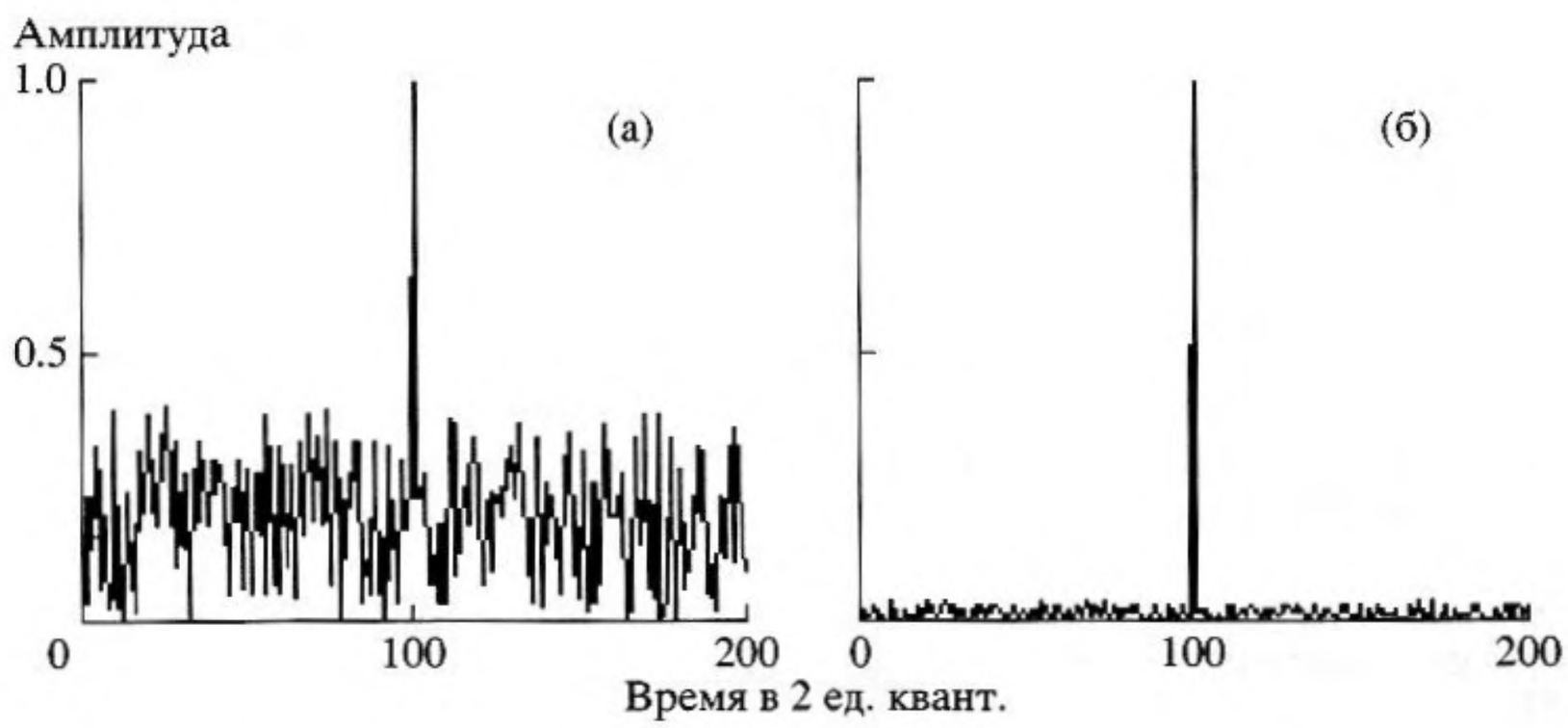

Рис. 2. Результат локации в отсутствие отражений от стенок волновода. Уровень реверберации на рисунке (а) больше, чем на рисунке (б), на 20 дБ.

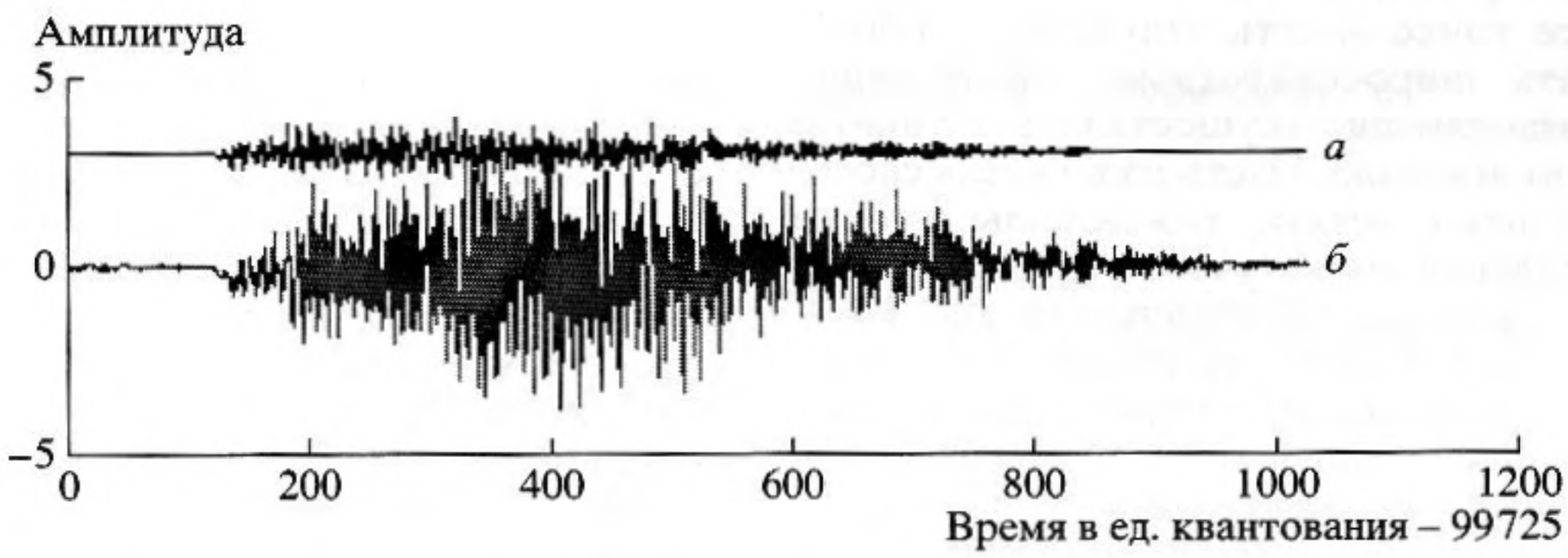

Рис. 3. Результат локации в волноводе при отсутствии объекта локации, выделяющегося на рис. 2, (а) и при его наличии (б). Уровень реверберации соответствует рис. 2а.

Задача настоящей статьи – показать, что в условиях многолучевого распространения сигналов помочь обнаружению искомого объекта локации может обращение волнового фронта (ОВФ).

В последнее время возрос интерес к использованию ОВФ в акустике [2]. Оказалось, что акустика гораздо более приспособлена к освоению методики ОВФ, нежели оптика [2]. Для создания волны с обращенным волновым фронтом в акустике не обязательно использовать специальные среды и нелинейное преобразование комплексных амплитуд сигналов в их комплексно сопря-

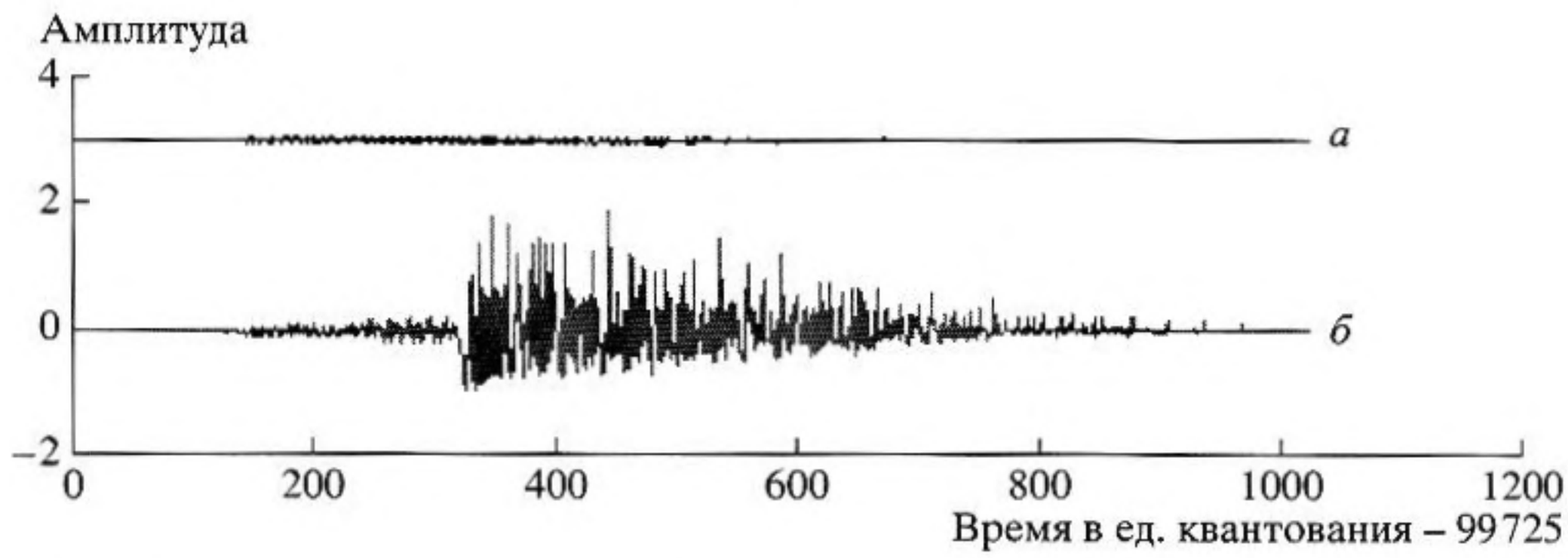

Рис. 4. Результат локации в волноводе в отсутствие объекта локации (*а*) и при его наличии (*б*). Уровень реверберации соответствует рис. 2б.

женные значения. Для получения эффекта обращения волнового фронта в акустике достаточно принять обычное действительное значение поля, например, последовательность коротких локационных импульсов, запомнить их, а затеи послать их обратно в ту же среду, изменив в них направление хода времени на обратное. В результате обратного хода волны в среде создается то же самое поле, которое посылалось. Это справедливо при прохождении волной сложной среды, содержащей рассеиватели, способные многократно рассеивать поле, многолучевую среду и другие неоднородности [2]. Эта возможность была реализована практически при распространении волны в мелком море [3—5].

Применим метод ОВФ к восстановлению особенностей формы импульсного сигнала, распространяющегося через многолучевую среду. Рассмотрим эту возможность на простейшем конкретном примере. Пусть в многолучевой среде в некоторой ее точке А есть излучатель, способный излучать широкополосные зондирующие сигналы, позволяющие осуществлять активную акустическую локацию. Пусть излучатель способен и принимать ответные эхо-сигналы в точке А. Такая система в многолучевой среде способна дать картину локации, показанную на рис. 3 и 4. Чтобы существенно изменить эту картину, сделаем следующее. В некоторой точке среды Б, в которой возможно появление объекта локации, представляющего интерес, излучим короткий импульсный сигнал. Этот сигнал будет принят в точке А. Принятый сигнал будет искажен многолучевостью и будет иметь вид, показанный на рис. 1. Обозначим этот сигнал буквой С. Если сигнал С обратить во времени и снова излучить в среду, то в среде в точке Б в том ее месте, где был излучен короткий импульс, будет наблюдаться точно такой же импульс [2]. Этим импульсом, поскольку он не искажен многолучевостью, целесообразно воспользоваться для локации. На рис. 5 показано волновое поле, образовавшееся в среде в результате ОВФ. Это волновое поле взаимодействует с объектами локации так, как в свободном пространстве. Волновод не участвует на начальной стадии этого процесса, что чрезвычайно существенно. На этой начальной стадии происходит перемножение короткого импульса, возникшего в среде путем ОВФ, с картиной отражений, показанной на рис. 2. В дальнейшем мы будем использовать только картину, показанную на рис. 2а. Как видно из рис. 5, среда с помощью ОВФ озвучивается неравномерно. Наблюдается фокусировка сигнала с максимальным значением, располагающимся на том расстоянии, с которого был излучен короткий импульс.

Если в точке Б в момент поступления туда импульса присутствует объект локации, то от него будет получен отраженный сигнал, имеющий форму сигнала С. Если же никакого объекта локации в точке Б в этот момент нет, то и никакого отклика не будет вообще. Для определения присутствия объекта локации в данный момент и в данном месте нам надо уметь отличать сигнал С от любых других сигналов. Для этого существует метод согласованной фильтрации. Надо сформировать фильтр, частотная характеристика которого является комплексно сопряженной сигналу С. Тогда на выходе такого фильтра мы получим в какой-то момент узкий импульс, длительность которого является обратной величиной ширине его полосы [6], а амплитуда определяется всей энергией сигнала. Наличие короткого импульса с большой амплитудой на выходе фильтра, согласованного с сигналом С, заменит собою тот импульс, который на рис. 2 является индикатором наличия интересующего нас объекта локации.

Вид отклика фильтра, согласованного с сигналом С, во времени показан на рис. 6 для двух случаев: для случая, когда в точке Б есть интересующий нас сигнал и когда его там нет.

Расчеты выполнены по следующим формулам. Прежде всего было смоделировано прохождение сигнала через волновод. Импульс описывался прямоугольной функцией $E(t)$, имеющей

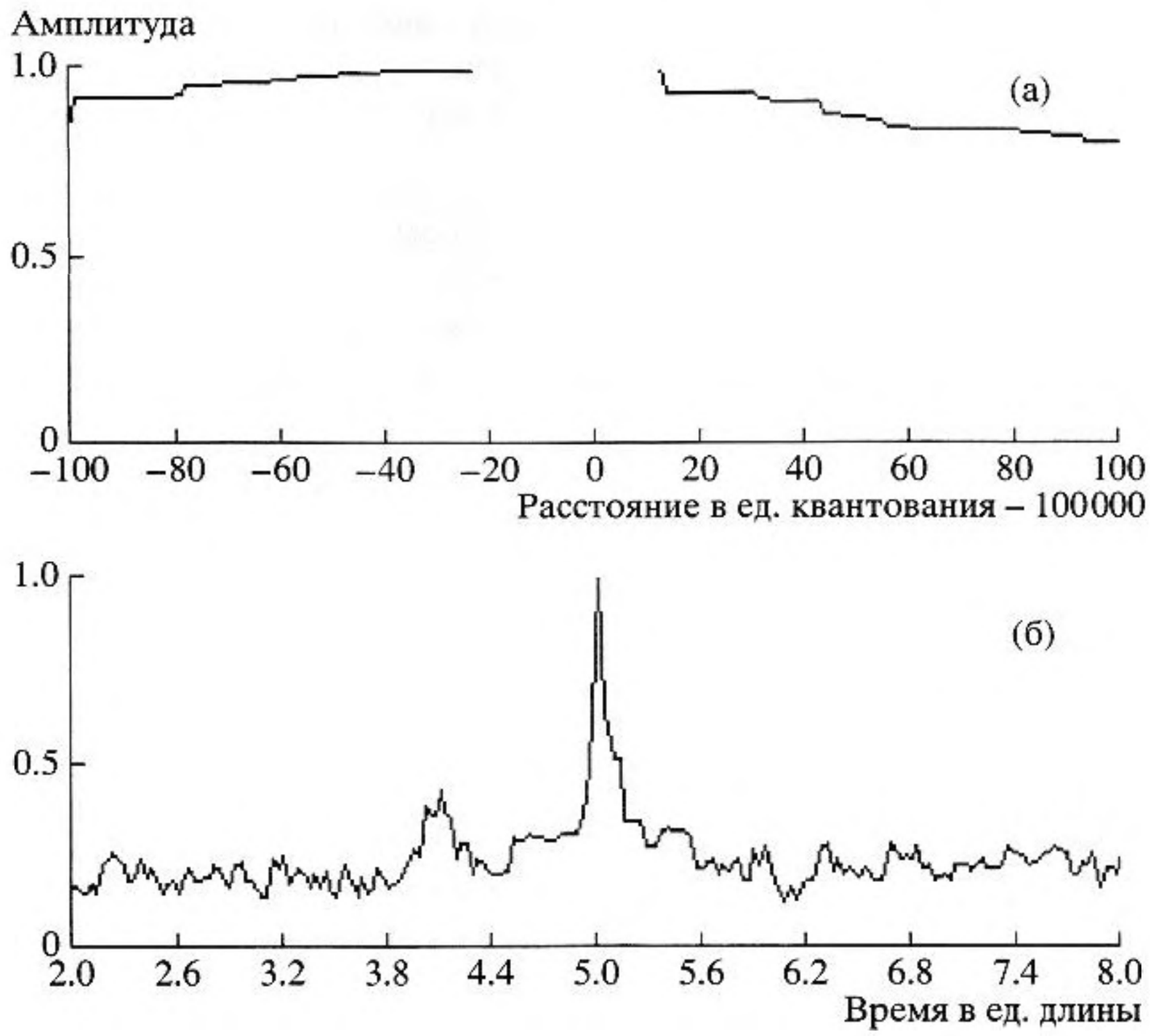

Рис. 5. Распределение поля в среде в результате излучения сигнала с ОВФ.

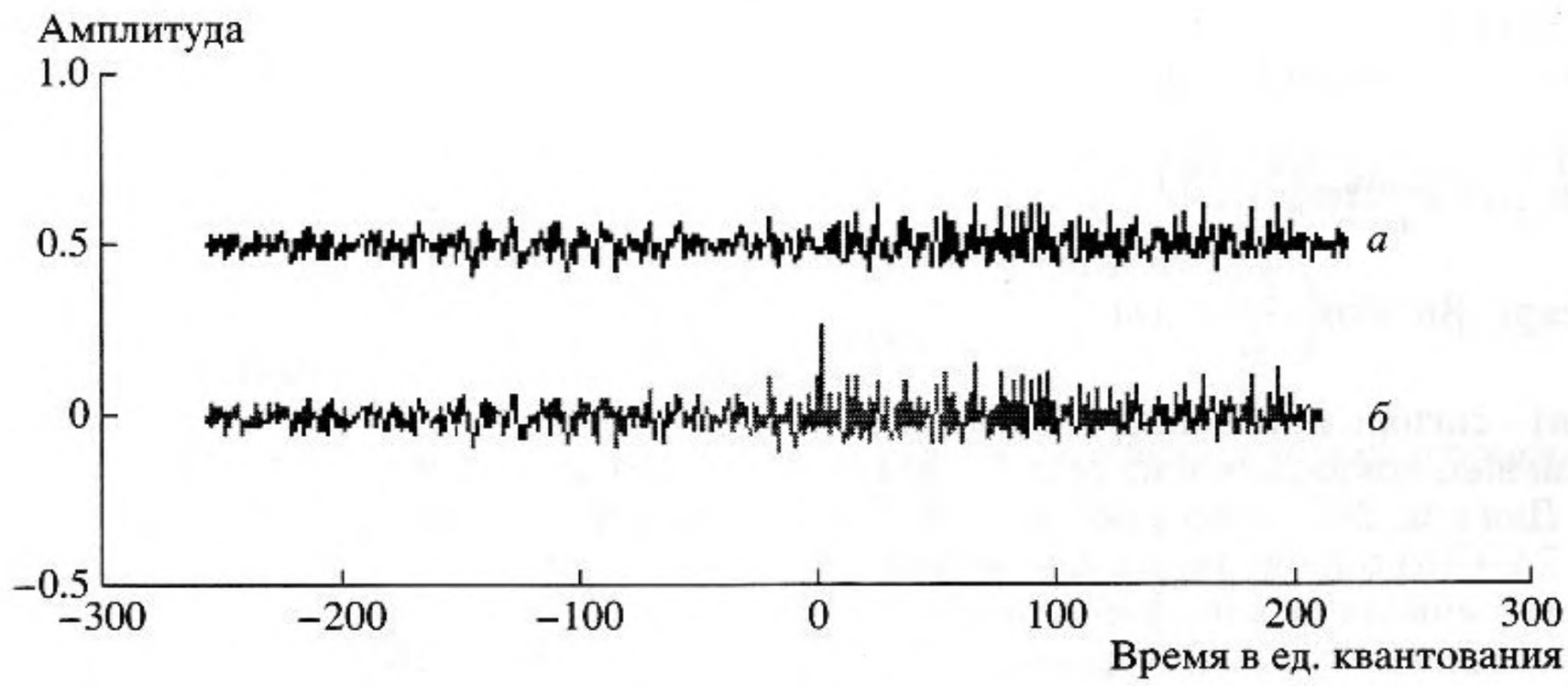

Рис. 6. Результат локации с помощью ОВФ в отсутствие объекта локации (*а*) и при его наличии (*б*). Уровень реверберации соответствует рис. 2а.

амплитуду, равную единице в одной точке интервала временного квантования при $t = 0$. Этот импульс повторялся в волноводе через определенные интервалы, определяемые расстоянием R между точками излучения и приема (А и Б) и глубиной волновода h. Расстояние, на котором наблюдается отраженный стенками волновода импульс номера n, определяется формулой:

$$r_n = \sqrt{R^2 + n^2 h^2}. \qquad (1)$$

Последовательность импульсов, показанная на рис. 1, формировалась сначала в спектральной области. Спектр этой последовательности определяется следующей суммой:

$$G(u) = \sum_n g(u)\exp(-\beta n)\exp\left(i\frac{2\pi}{L}ur_n\right). \qquad (2)$$

Здесь u – пространственная частота; β – коэффициент затухания импульсов при отражении от

стенок волновода; $g(u)$ – спектр отдельного единичного импульса $E(t)$, занимающего в пространстве один интервал квантования; $L = 512$ – величина общего массива данных. Искомая последовательность импульсов, показанная на рис. 1, определится как Фурье-спектр $G(u)$. Значения параметров выбирались так, чтобы по возможности моделировать распространение акустического импульса в мелком море. Принято $R = 5$, $h = 0.02$. Интервал квантования по дистанции выбирался настолько малым, чтобы значения r_n достаточно хорошо описывались бы целыми числами. Величина интервала квантования в 20000 раз меньше единицы длины. На рисунках расстояние указано в единицах квантования длины или времени за вычетом числа интервалов, указанных на рисунке. Величина n ограничивалась всего 20 значениями. Увеличение n до 50 или до 100 значений весьма мало сказывается на результатах.

Реверберация, показанная на рис. 2, моделировалась набором случайных чисел $Q(m)$, значения которых равномерно распределены в интервале от 0 до 0.4 (на рис. 2а) и от 0 до 0.04 (на рис. 2б). Реверберация равномерно распределялась по длине трассы через 2 интервала квантования по расстоянию (0.0001 единицы расстояния) в пределах 200 значений длины m с центром при $R = 5$. Объект локации в центре рис. 2а и 2б имел амплитуду, равную 1.

Спектры сигналов, показанных на рис. 3 и 4, вычислялись по следующей формуле:

$$U(u) = \sum_n \sum_m Q(m) G(u) \times \exp(-\beta n) \exp\left(i \frac{2\pi}{L} u r_n(m)\right). \quad (3)$$

Здесь $Q(m)$ – сигнал, показанный на рис. 2. Для рис. 3а это сигнал, показанный на рис. 2а, без пика в центре. Для рис. 3б это весь сигнал, показанный на рис. 2а. $G(u)$ определяется формулой (2). Функция $r_n(m)$ вычислялась по формуле (1), в которую подставлялась следующая функция $R(m)$:

$$R(m) = 5 - 0.0001(m - 100). \quad (4)$$

Рис. 4 строился точно так же, как и рис. 3, только с использованием функции $Q(m)$, показанной на рис. 2б.

На рис. 5 показано поле, возникающее в среде при излучении из точки A сигнала, обратного по времени сигналу C. Поле в среде определялось через его спектр. Результат ОВФ в среде получается путем обратного преобразования Фурье следующей функции:

$$K(u) = G(u)\overline{GR(u)}, \quad (5)$$

где функция $G(u)$ определяется (2); функция $GR(u)$ также определяется (2) при соответствующем значении R, а черта сверху означает комплексное сопряжение. На рис. 5а фокусировка показана в более крупном масштабе в виде функции номера интервала квантования. Из этого рисунка следует, что в том диапазоне расстояний, в котором моделировался эффект, фокусировка слабо влияет на результат расчета.

Сигналы, показанные на рис. 6, получены с использованием формулы:

$$M(u) = \sum_n \sum_m Q(m) g(u) \times \exp(-\beta n) \exp\left(i \frac{2\pi}{L} u r_n(m)\right). \quad (6)$$

Выражение (6) отличается от (3) тем, что в нем иной спектр зондирующего сигнала. Вместо функции $G(u)$ использована функция $g(u)$. Временной отклик согласованного фильтра получен с помощью обратного преобразования Фурье функции $V(u)$, определяемой следующей формулой:

$$V(u) = G(u)\overline{M(u)}. \quad (7)$$

Судить об эффективности использованного метода можно путем сравнения рис. 3 и 6. Как на том, так и на другом рисунке показан результат локации, но на рис. 3 этот результат показан без устранения многолучевости, а на рис. 6 многолучевость устранена благодаря использованию ОВФ.

Изложенный метод не может изменить отношение интенсивности отраженного сигнала от искомого объекта к сигналу реверберации. Метод позволяет только освободиться от влияния многолучевости на форму принимаемого сигнала, что тоже весьма существенно. На рис. 6 величина отношения максимального сигнала к σ отличается от соответствующего отношения для рис. 2а менее, чем на 1 дБ. Это отличие и отличие вида сигнала, показанного на рис. 6б, от сигнала на рис. 2а можно объяснить изменением вида распределения. На рис. 2а принято равномерное распределение в пределах заданного интервала значений, а на рис. 6 распределение становится ближе к нормальному.

Описанным способом можно хорошо обнаружить объект локации в одной точке. Эта точка может быть не одна в том случае, если форма сигнала С сохраняет свой вид и в другой точке. Во всех точках, в которых форма сигнала С остается неизменной, объект локации может быть обнаружен с помощью указанной процедуры. В том случае, если волновод цилиндрический и достаточно однороден, то точка, в которой объект локации дает узкий отклик, в согласованном фильтре пре-

вращается в геометрическое место точек, представляющее собой окружность.

Теоретически возможно осуществить описанную методику избавления от реверберационных искажений путем вычисления формы ожидаемого сигнала С на основе данных о свойствах среды. Последнюю фразу я написал с большим трудом, испытывая внутренний протест к тому, что я пишу. Дело в том, что я не знаю, что именно надо измерять в среде и с какой точностью. Поэтому путь вычисления формы сигнала С скорее всего надо отвергнуть и даже не обсуждать. Остается путь непосредственного измерения отклика среды, что и было описано выше. При этом остается одно существенное ограничение. Среда, в которой производится указанное действие, должна быть достаточно стабильной.

Здесь рассмотрен один из видов реверберации – многолучевость. Существуют и иные виды реверберации, например, отражения сигналов от неровностей дна взволнованной поверхности [7]. Для этих видов реверберации рассмотренный здесь прием, по-видимому, бесполезен.

Автор благодарен В.И. Таланову, А.Г. Лучинину, Б.М. Салину за интерес, проявленный к этой работе, и полезные замечания. Автор благодарен рецензенту журнала за полезные рекомендации.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты № 00-15-96741 и № 02-02-17056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 194 с.
2. *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. 63 (2000). P. 1933–1995. Printed in the UK.
3. *Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song Hee C., Akal T., Ferla C., Jackson D.* Phase conjugation in the ocean: experimental demonstration of an acoustic time reversal mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. P. 25–40.
4. *Hodgkiss W., Song H., Kuperman W., Akal T., Ferla C., Jackson D.* A long range and variable phase conjugation experiment in shallow water // J. Acoust. Soc. 1999. V. 105. P. 1597–1604.
5. *Song H., Kuperman W., Hodgkiss W., Akal T., Ferla C.* Iterative time reversal in the ocean J. Acoust. Soc. 1999. V. 105. P. 3176–3184.
6. *Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Л.* Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1960. 474 с.
7. *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.

Phase Conjugation for Suppressing the Effect of Multipath Propagation on the Result of Active Location

V. A. Zverev

For an ideal waveguide used as an example, a possibility to suppress the effect of multipath propagation on the target detection by applying the wave conjugation is demonstrated.