

УДК 542.26

ВИРТУАЛЬНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ

С.И. Каменев

Тихоокеанский океанологический
институт им. В.И Ильичева ДВО РАН¹

Представлены результаты натуральных и модельных экспериментов с виртуальной гидроакустической системой обращения времени, в которой обработка в пространственной области заменена временной обработкой сложных сигналов, дополнительно модулированных короткими последовательностями с хорошими корреляционными свойствами. Натурные эксперименты проводились на стационарных трассах в Японском море.

1. Введение

Метод обращения времени находит применение для решения целого ряда прикладных задач гидроакустики. К таким задачам относятся фокусировка поля, активное гашение, акустические барьеры, звукоподводная связь и другие. Характеристикой масштабности работ в этом направлении является тот факт, что для исследований, связанных с различными аспектами метода, активно используются специализированные полигоны Центра подводных исследований НАТО (Специя, Италия) и Морской физической лаборатории (Сан-Диего, США), а результаты исследований нашли отражение в многочисленных публикациях В.А. Купермана и др. [1-7]. В этой связи следует отметить работы М. Финка [8-11] и В.А. Зверева [12-14].

Классический принцип обращения времени заключается в следующем:

- осуществляется излучение сигнала $s(t)$ пробным источником;

- производится прием сигнала $r_i(t)$, прошедшего через среду с импульсной характеристикой $h_i(t)$, i -м элементом вертикальной приемоизлучающей антенны;

- излучаются обращенные во времени сигналы в направлении расположения пробного источника;

- пассивная вертикальная антенна регистрирует сигнал $\tilde{s}(t)$.

Последовательность этапов классического обращения представляется с помощью оператора свертки (*) следующим образом:

$$s(t); r_i(t) = s(t) * h_i(t); r_i(-t);$$

$$\tilde{s}(t) = s(-t) * \sum_{i=1}^N h_i(-t) * h_i(t).$$

Оценим влияние фактора $q(t) = h(-t) * h(t)$, собственно и характеризующего основную идею метода обращения времени. Представим принятый сигнал в виде:

$$r(t) = \sum_{k=0}^{M-1} a_k s(t - \tau_k),$$

где a_k, τ_k - амплитуда и задержка во времени i -го прихода излученного сигнала соответ-

ственно. Предположим, что число приходов $M=3$, и представим преобразование сигнала $s(t)$ в сигнал $r(t)$ в виде векторов амплитуд и относительных задержек, характеризующих влияние импульсной характеристики $h(t)$ для случая трех приходов:

$$\{a_0; a_1; a_2\}, \{0; \tau_1; \tau_2\}.$$

Положим для определенности $\tau_2 > 2\tau_1$, тогда для фактора $q(t)$ будем иметь:

$$\{a_0 a_2; a_1 a_2; a_0 a_1; a_0^2 + a_1^2 + a_2^2;$$

$$a_0 a_1; a_1 a_2; a_0 a_2\},$$

$$\{-\tau_2; \tau_1 - \tau_2; -\tau_1; 0; \tau_1; \tau_2 - \tau_1; \tau_2\}.$$

Видно, что сигнал $\tilde{s}(t)$ может занимать во временной области интервал $[-\tau_2, T + \tau_2]$ при длительности сигнала пробного источника T , если не производить дальнейшую обработку - пространственную или временную. Отметим, что уровень боковых лепестков функции $q(t)$ в лучшем случае может составлять $1/M$ от уровня главного лепестка, в котором приходы суммируются энергетически. При постоянстве условий пространства прямых и обращенных сигналов можно полностью исключить влияние мультипликативных помех.

2. Основные положения

В основе работы лежит, в частности, рассмотренная в [14] возможность при некоторых условиях заменять пространственную обработку обработкой во временной области.

Функционирование рассматриваемой виртуальной гидроакустической системы обращения времени заключается в излучении пробным источником сигналов $s_i(t)$, $i=1, 2, \dots$ и

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел: (4232)311-631, e-mail: kamenev@poi.dvo.ru

$s'(t)$, приеме этих сигналов одноэлементной приемной системой и последующей обработке во временной области в соответствии с алгоритмом:

$$s_i(t), s'(t); r_i(t) = s_i(t) * h_i(t),$$

$$r'(t) = s'(t) * h'(t);$$

$$r'(-t);$$

$$\tilde{s}_i(t) = s'(-t) * s_i(t) * h'(-t) * h_i(t).$$

Предполагая $h_i(t) = h'(t) = h(t)$, т.е. постоянство условий распространения сигналов $s_i(t)$ и $s'(t)$, можно для рассмотренного выше представления получить выражение для фактора $q(t)$, аналогичное классическому, что и оправдывает применение термина «виртуальная система обращения времени». Концепция виртуальной гидроакустической системы обращения времени, согласно которой пространственная обработка заменяется обработкой во временной области, позволяет реализовать идеи обращения времени в условиях, когда применение классического подхода затруднительно [15, 16].

Временная обработка в экспериментах с виртуальной гидроакустической системой обращения времени обеспечивала фокусировку-сжатие временного интервала, занимаемого сигналом $\tilde{s}(t)$, за счет соответствующего выбора сигналов $s_i(t)$ и $s'(t)$. В нашем случае на разных этапах исследований для решения конкретных задач использовались M-последовательности с длиной L, равной 31, 127 и 511 символов. В экспериментах с двухканальной системой использовалась пара предпочтительных 511-символьных M-последовательностей для сигналов $s_i(t)$, а сигнал $s'(t)$ формировался в соответствии с выражением:

$$s'(t) = \sum_i s_i(t) ** p_i(t),$$

где $p_i(t)$ – сигналы модификации, ** - символ циклической свертки.

Принцип формирования сигнала с циклической сверткой поясняет рис. 1.

Ансамбль сигналов $s_i(t)$ может быть расширен за счет последовательностей Голда или Касами, сгенерированных на основе вы-

бранных предпочтительных M-последовательностей [17]. В качестве модифицирующих могут использоваться любые последовательности, однако выигрыш в дополнительной обработке могут дать ортогональные или квазиортогональные последовательности, например, функции Уолша, сигналы Баркера и др.

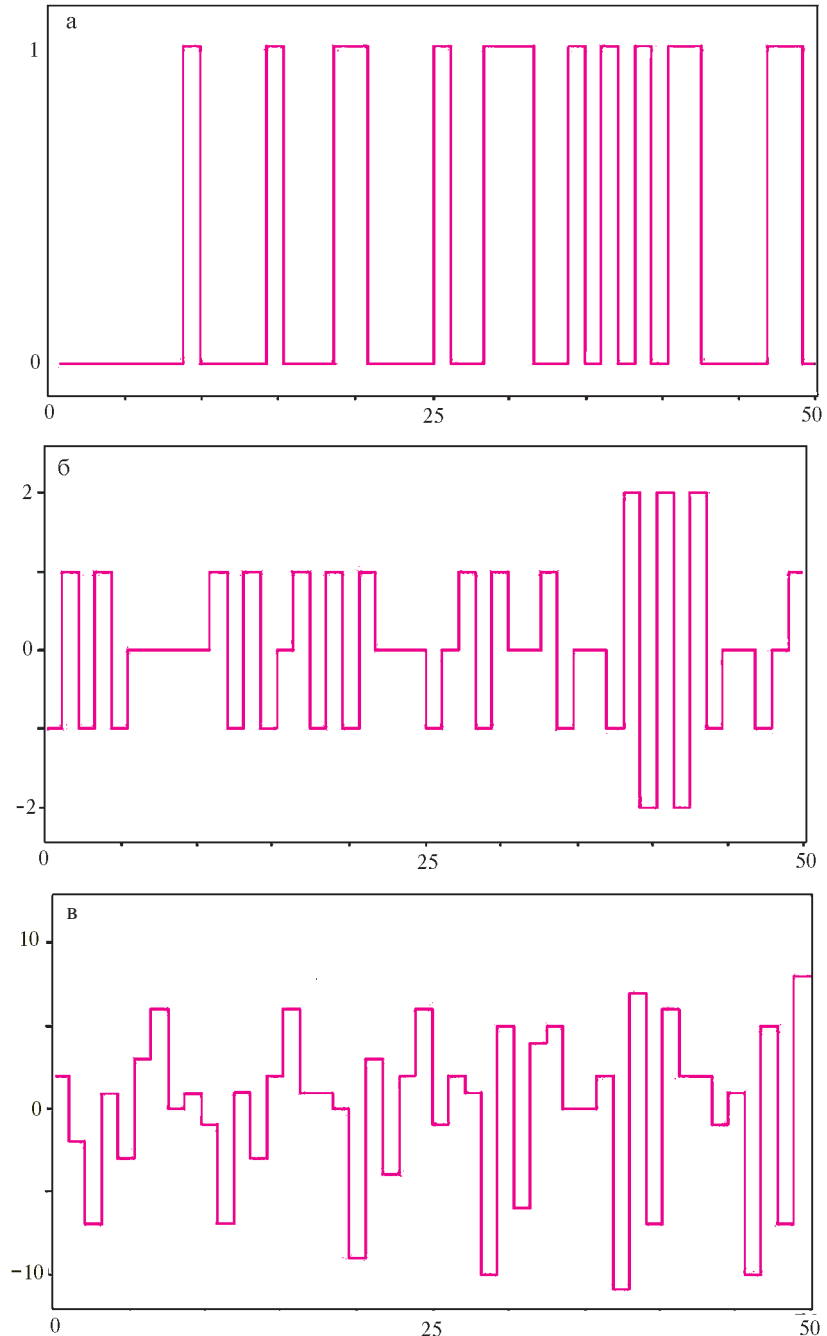


Рис. 1. Формирование сигнала $s'(t)$: а – исходная M-последовательность -первые 50 символов; б – модификация кодом [100001]; в – модификация кодом [1{00001111}...{00001111}]

3. Экспериментальные результаты

Схема одного из натуральных экспериментов была реализована в Японском море в рамках исследований, проводимых отделом технических средств ТОИ ДВО РАН (руководитель Ю.Н. Моргунов) и выглядела следующим образом. Широкополосный акустический излучатель был установлен в 400 м от береговой линии на глубине 39 м при глубине места 40 м. Прием сигналов осуществлялся на заглубленный гидрофон дрейфующей приемной системы, расстояние до которой от излучателя составляло около 80 км. Трасса в направлении на банку Кита-Ямато проходила через шельфовую зону длиной 15 км с перепадом глубин 40-100 м, шельфовый сброс и глубокое море с глубинами порядка 3000 м. Гидрологические условия характеризовались придонным звуковым каналом - на шельфе и подводным звуковым каналом - в глубоководной части трассы.

В данном эксперименте мы использовали последовательности Шермана [110010100] и [001100101] для сигналов $p_1(t)$ и $p_2(t)$ соответственно. Данные последовательности отличаются друг от друга сдвигом на два символа, главные лепестки их автокорреляционных функций также сдвинуты на два символа и имеют четырехкратное превышение над уровнем боковых лепестков.

В состав сигнального фрейма были включены сигналы $s_1(t)$, $s_2(t)$ и $s'(t)$, начала излучения которых были смещены на 10 секунд и которые представляли собой предпочтительные M-последовательности и их модификацию с числом символов 511 и длительностью символа, равной четырем периодам несущей частоты 360 Гц. Длительность исходных сигналов

составляла 5,678 секунд, модифицированного - 5,789 секунд. Модифицированный сигнал неоднократно дублировался для репрезентативности статистики: его излучение повторялось каждые 10 секунд. Фрейм общей длительностью 3 минуты включал в себя и другие сигналы и излучался около часа.

Результаты обработки одной из реализаций представлены на рис. 2 и 3.

В модельном эксперименте в качестве модифицирующих использовались биортогональные коды на основе последовательностей Уолша [17]:

$$\begin{aligned} W_0\{1, 1, 1, 1\}, \\ W_1\{1, 1, -1, -1\}, \\ W_2\{1, -1, -1, 1\}, \\ W_3\{1, -1, 1, -1\}. \end{aligned}$$

В качестве опорного сигнала и информационных, связанных с функциями Уолша сигналов, были синтезированы специальные последовательности, которые подвергались нелинейному сжатию при излучении и расширению в приемной системе (рис. 4). Центральная частота была задана равной 1600 Гц. Уровень боковых лепестков при корреляционной обработке составляет ≈ -40 дБ. Амплитуда сигналов лежит в интервале 1-2,5. Для сравнения: 127-символьная периодическая M-последовательность при уровне боковых лепестков -42 дБ будет иметь разброс амплитуд от 0 до 6. При этом длительность опорного и информационных сигналов будет больше на порядок.

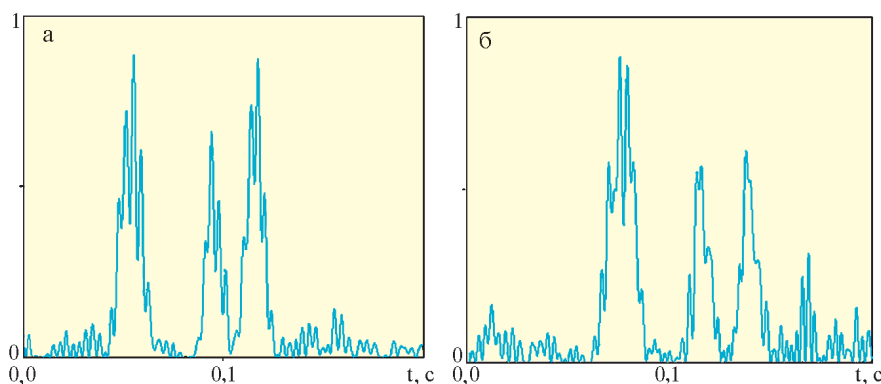


Рис. 2. Результат обработки: а – сигнал $\tilde{s}_1(t)$; б – сигнал $\tilde{s}_2(t)$

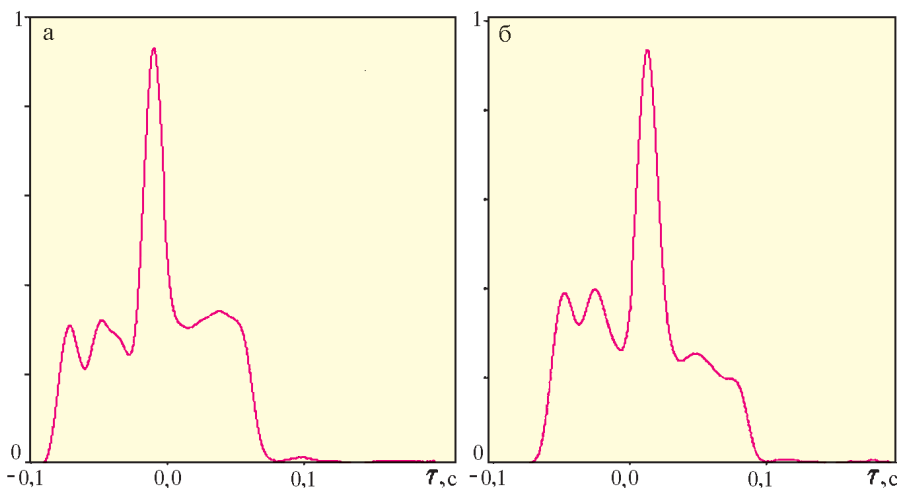


Рис. 3. Результат обработки: а – свертка $\tilde{s}_1(t)$ с $p_1(t)$; б – свертка $\tilde{s}_2(t)$ с $p_1(t)$

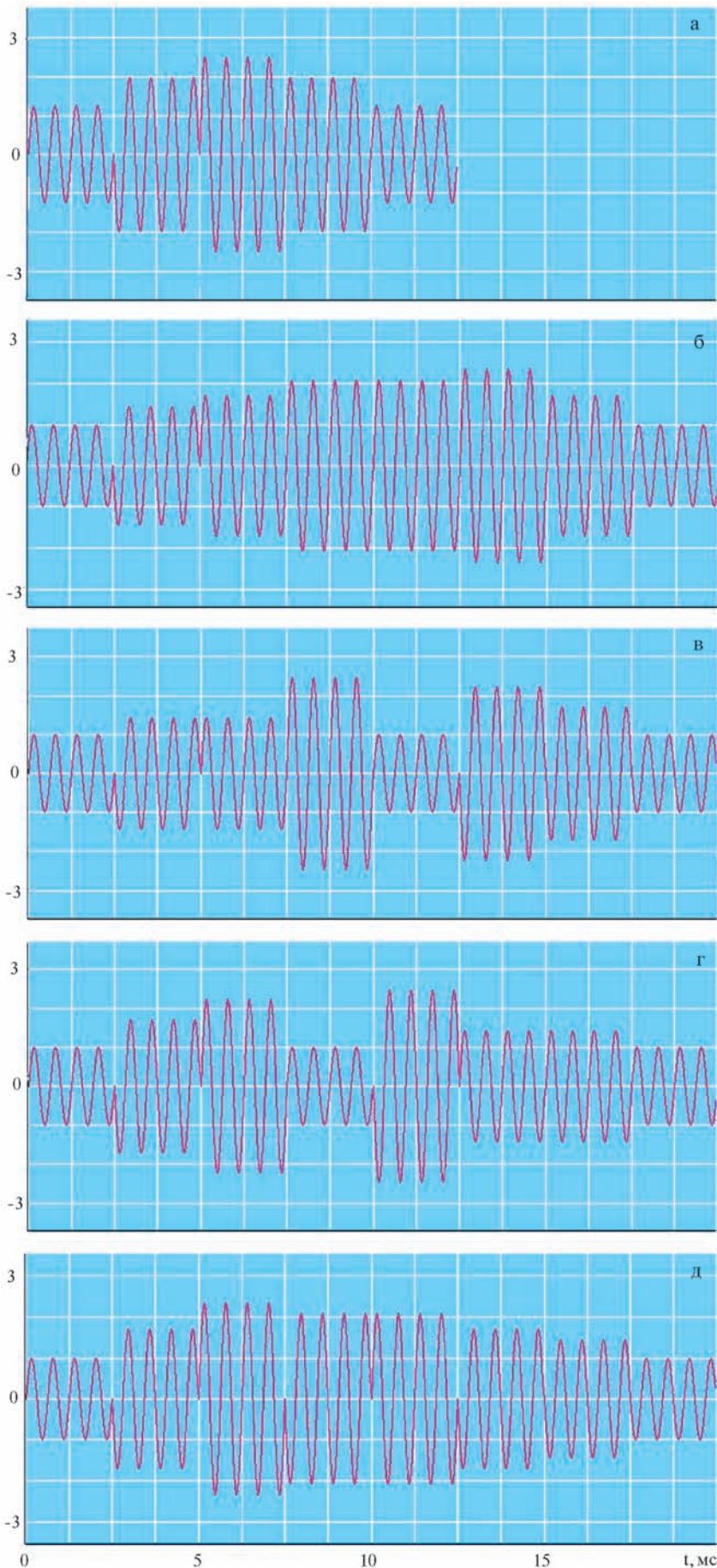


Рис. 4. Синтезированные сигналы: а – опорный; б – модификация W0; в – модификация W1; г – модификация W2; д – модификация W3

Рисунки 5 и 6 иллюстрируют применение виртуальной системы обращения времени в рассматриваемом модельном эксперименте. Результаты первичной обработки (свертки информационных последовательностей с опорной) приведены на рис. 5. На рис. 6 представлен ряд сверток (корреляционных функций) информационных посылок из набора восьми биортогональных кодов с импульсными характеристиками четырех согласованных фильтров на основе функций Уолша. Данные рисунка свидетельствуют о надежном выделении передаваемых последовательностей. Центры корреляционных функций лежат в интервале двойной длины символа исходной последовательности и принимают ненулевое значение в случае выполнения условия ортогональности и нулевое – в противном случае.

4. Заключение

Серьезная проблема экспериментальной реализации классического подхода обращения времени связана с необходимостью применения развитых в вертикальной плоскости пассивных и активных антенн, что в условиях нашего полигона требует применения сложных систем позиционирования для учета влияния морских течений на конфигурацию антенны, систем антивандальной защиты и т.п.

Кроме приведенного выше технического ограничения можно привести следующее. Для протяженной трассы порядка 558 км [16] переизлучать сигнал пробного источника практически бес-

Рис. 5. Результат обработки: а – W_0 ; б – W_1 ; в – W_2 ; г – W_3

полезно, так как время распространения составляет порядка 6,2 минуты, среднее значение отношения сигнал/шум после корреляционной обработки - 17 дБ, а энергетические потери на распространение составляют около 115 дБ. Применение одиночного приемопередатчика, не говоря уже об активной вертикальной антенне, в данных условиях сомнительно.

Примененный подход эффективен при борьбе с мультипликативными помехами, так как при этом осуществляется энергетическое суммирование сигналов, прошедших по различным путям с различными случайными амплитудами, задержками и фазами.

Также учитывается влияние сигналов, испытавших различные доплеровские смещения за счет возможных движений излучателя, приемника или среды.

Выделенные в результате первичной обработки сигналы хорошо сворачиваются с исходными модифицирующими последовательностями, усиливая эффект фокусировки.

В целом модельный и натурный эксперименты показали работоспособность и эффективность виртуальной гидроакустической системы обращения времени, которая может использоваться в различных областях подводной акустики, таких как термометрия, беспроводная связь, дальнометрия и др.

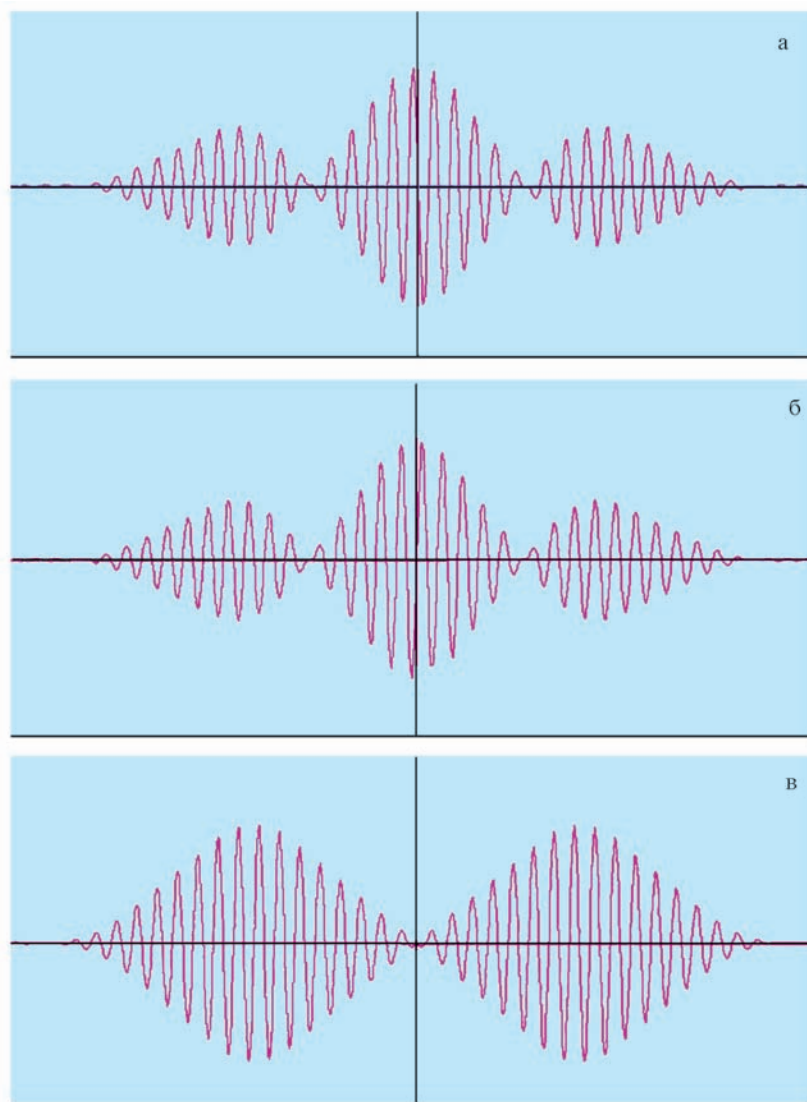
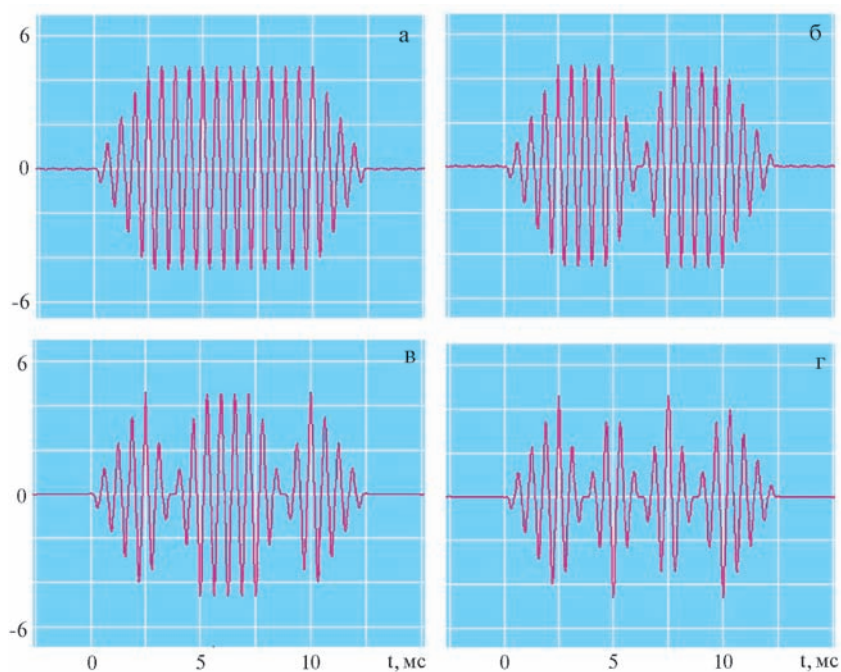


Рис. 6. Сигналы на выходе фильтра W_1 , если на входе: а – W_1 ; б – $-W_1$; в – W_0

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C. et al. Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of a time reversal mirror // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. Vol. 103. P. 25-40.
2. Song H.C., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S. A time-reversal mirror with variable range focusing // *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. Vol. 103. P. 3234-3240.
3. Hodgkiss W.S., Song H.C., Kuperman W.A. et al. A long range and variable focus phase conjugation experiment in shallow water // *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. Vol. 105. P. 1597-1604.
4. Song H.C., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S. et al. Demonstration of a High Frequency Acoustic Barrier With a Time Reversal Mirror // *IEEE J. Oceanic Eng.* 2003. Vol. 28. P. 246-249.
5. Song H.C., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A. et al. Experimental demonstration of adaptive reverberation nulling using time reversal // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. Vol. 118. P. 1381-1387.
6. Sabra K.G., Roux P., Song H.C. et al. Experimental demonstration of iterative time-reversed reverberation focusing in a rough waveguide. Application to target detection // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. Vol. 120. P. 1305-1314.
7. Song H.C., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A. et al. Passive reverberation nulling for target enhancement // *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. Vol. 122. P. 3296-3303.
8. Fink M. Time reversal acoustics // *Physics Today.* 1997. Vol. 50. P. 34-40.
9. Fink M. Time-reversed acoustics // *Scientific American.* 1999. Vol. 281. P. 91-97.
10. Kerbrat E., Prada C., Cassereau D., Fink M. Imaging in the presence of Grain Noise using the Decomposition of the Time Reversal Operator // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. Vol. 113, No. 3. P. 1230-1240.
11. Фольгот Т., Прода С., Финк М. Resolution enhancement and separation of reverberation from target echo with the time reversal operator decomposition // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. Vol. 113, No. 6. P. 3155-3160.
12. Зверев В.А. Избранные труды. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2004. 432 с.
13. Зверев В.А., Стромков А.А. Экспериментальное исследование фокального пятна антенны обращения времени // Сборник трудов XIX сессии Рос. Акуст. о-ва. М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 336-339.
14. Зверев В.А. Радиооптика (Преобразование сигналов в радио и оптике). М.: Сов. радио, 1975. 304 с.
15. Каменев С.И. Виртуальная гидроакустическая система обращения времени с использованием сложных фазоманипулированных сигналов // Сборник трудов XX сессии РАО. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 332-335.
16. Каменев С.И. Экспериментальные исследования виртуальной гидроакустической системы обращения времени // Акустика неоднородных сред: Сб. тр. школы-семинара под руководством проф. С.А. Рыбака. Троицк: Изд-во "Тривант", 2008. С. 135-145 (Ежегодник РАО; Вып. 9).
17. Proakis J. *Digital Communications.* NY: McGraw-Hill, 2001. 930 p.

