

УДК 621.396.96

© Р. В. Викторов, В. С. Колмогоров, Э. В. Москаленко, А. С. Шпак

Филиал Военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия», г. Владивосток
rusvictorov@yandex.ru

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

Рассматривается механизм возникновения амплитудной модуляции при рассеянии гидроакустического сигнала на взволнованной морской поверхности и возможность использования принципов адаптивной фильтрации при реализации интерференционного обнаружителя движущихся подводных объектов. Приведены результаты экспериментов в натуральных условиях интерференционного гидроакустического поля по выделению сигнала с использованием адаптивного фильтра.

Ключевые слова: адаптивный фильтр, интерференция, зона Френеля, амплитудная модуляция.

Обнаружение подводного объекта в прибрежных районах в активном режиме работы гидроакустического средства (ГАС) затруднено из-за высокого уровня донной и поверхностной реверберации.

Так, например, область освещения подводной обстановки существующими ГАС обнаружения подводно-диверсионных сил и средств (ПДСС) ограничена изобатой 5—10 м, которая может отстоять от прибрежной кромки водной акватории на расстоянии до сотни метров. При этом площадь прибрежной зоны, ограниченная глубинами менее 5—10 м, где использование активных гидролокационных средств неэффективно, может составлять до 50 % от общей площади охраняемой акватории. Поэтому на практике подводные диверсанты неоднократно успешно выполняли задачи по уничтожению охраняемых объектов прибрежного базирования, при этом беспрепятственно проникали через охранные системы подводного наблюдения активных ГАС. При форсировании охраняемого рубежа маршрут диверсанта проходит вблизи берегового шельфа с глубинами, не превышающими несколько метров, где пловцу легко ориентироваться, а вероятность его обнаружения активным гидролокатором низкая из-за повышенного уровня маскирующей помехи, возникающей от переотражений сигнала от дна и поверхности моря. В связи с этим возникла необходимость разработки метода обнаружения пловцов в мелководных районах при развитой структуре интерференционного гидроакустического поля.

В то же время в существующих охранных системах промышленных объектов широко используются объемные датчики движения, использующие принцип обнаружения движущегося объекта по нарушению сложившейся интерференционной картины. В таких датчиках, путем излучения акустических или электромагнитных волн в замкнутых пространствах, создается интерференционная структура акустического или электромагнитного поля от стационарно закрепленных, неподвижных границ охраняемого пространства (салон автомобиля, строительное помещение и т. п.) за счет многократных отражений излученного сигнала локально расположенного источника излучения. В случае если в эту сложившуюся интерференционную структуру поместить движущийся объект, на выходе стационарно расположенного приёмника будут наблюдаться амплитудные флюктуации сигнала за счет изменения сложившейся интерференционной картины, что адекватно амплитудной модуляции излученного гидроакустического сигнала [1].

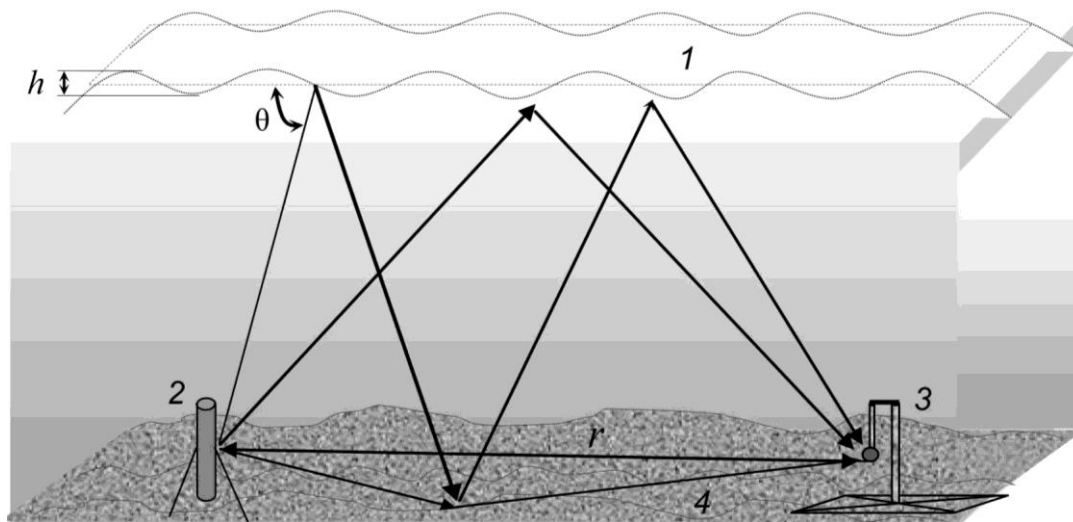


Рис. 1. Формирование акустического поля на приемном гидрофоне.
 1 — поверхность моря, 2 — излучатель, 3 — приемный гидрофон, 4 — дно моря.
 h — среднеквадратическое значение возвышений неровной поверхности, м; θ — угол скольжения падающей волны, градусы; r — расстояние между излучателем и приемным гидрофоном, м;

Реализация принципа объемного датчика по обнаружению движущегося подводного объекта в морских условиях затруднена, так как при распространении акустических волн в морской среде за счет отражения от взволнованной морской поверхности будут происходить помеховые искажения сигнала за счет модуляции излученного сигнала от колеблющейся поверхности. Принцип формирования интерференционной зоны излучателя в мелководном прибрежном районе представлен на рис. 1.

Акустические сигналы при многократном отражении от поверхности моря и дна создают развитую интерференционную структуру акустического поля, возникновение которой возможно при малом значении параметра Рэлея, определяемого выражением: $ReI = 2kh(\sin\theta)$, где k — волновое число излученного сигнала; r — расстояние между излучателем и приемным гидрофоном, м; h — среднеквадратическое значение возвышений неровной поверхности, м; θ — угол скольжения падающей волны, градусы. [2, 3].

Но как показали экспериментальные исследования в гидроакустическом бассейне и натуральных условиях [4—6], реализация объемного датчика движения в морских условиях на основе компенсации модуляционной составляющей отраженного от взволнованной морской поверхности гидроакустического сигнала с использованием принципов адаптивной фильтрации возможна. При этом, в схемах обработки сигнала при проведении экспериментальных исследований в гидроакустическом бассейне и натуральных условиях использовался адаптивный нерекурсивный фильтр типа LMS (Least Mean Square) из блока DSP пакета расширения Simulink системы MATLAB, основанный на принципе минимизации градиента мгновенного значения ошибки между образцовым и входным сигналом при использовании метода наименьших квадратов [7].

Для анализа акустического поля в морской среде при излучении сигнала были произведены расчеты поля с использованием программы волнового расчета акустического поля на основе псевдодифференциальных параболических уравнений [6].

На рис. 2 показаны расчеты акустического поля для точечного источника звука, помещенного в шельфовой зоне мелководного района до дистанции 250 м. Из рисунка видно, что при излучении звука в морском волноводе формируется интерференционная картина.

На рис. 3 представлена экспериментально полученная амплитудно-пространственная диаграмма сигнала на одном из участков его «протяжки» в морской акватории. «Протяжка» гидрофона производилась путем перемещения по линейной траектории в морской акватории гидрофона при удалении его от излучателя.

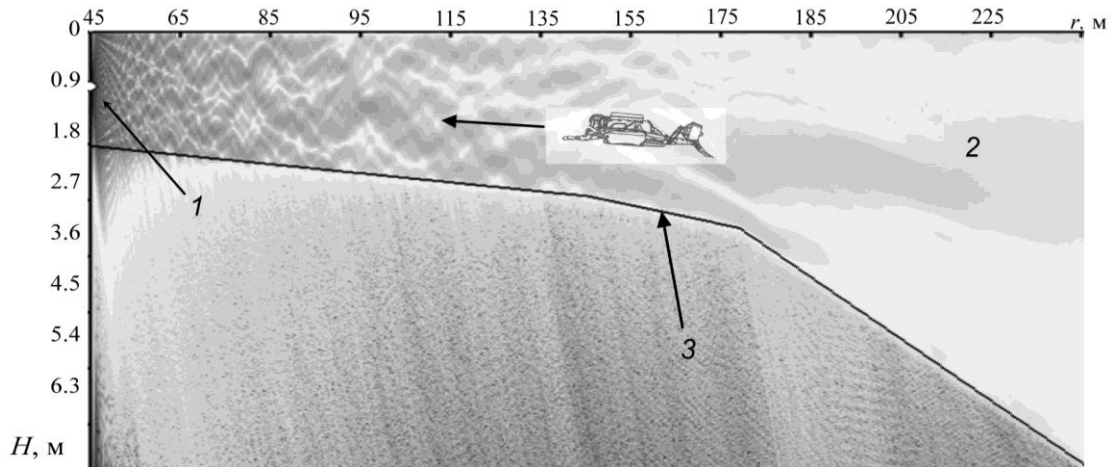


Рис. 2. Интенсивность акустического поля для мелководного района до дистанции 250 м (источник звука точечный, дистанция от берега 45 м, $F=20$ кГц). 1 — излучатель звука на глубине 0.9 м, 2 — водная акватория, 3 — рельеф дна. Оттенками серого изображена величина звукового давления.

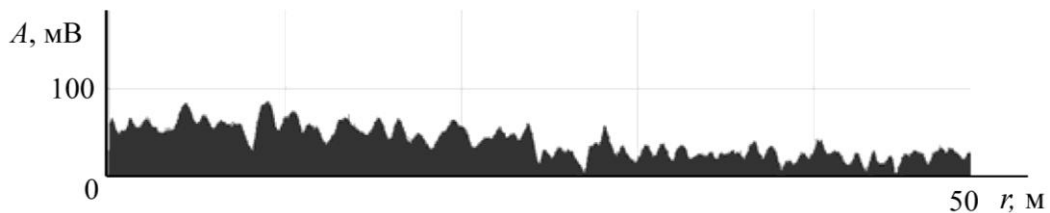


Рис. 3. Амплитудно-пространственная диаграмма уровня сигнала на частоте 10 кГц на выходе приемного гидрофона при изменении дистанции до излучателя.

Из анализа рис. 3 видно, что в морской акватории, где проводились эксперименты, при излучении акустического сигнала была сформирована интерференционная картина.

Интерференционное поле в конечном счете будет определяться распределением энергетического вклада в суммарное поле когерентных составляющих переотраженного от поверхности и дна моря акустического сигнала. В общем случае звуковое давление p в каждой точке акустического поля морской среды можно рассматривать как суперпозицию прямого и отраженных от границ акустических волн и рассчитать с использованием мнимых источников, образованных за счет отражения от границ морской среды (поверхность и дно моря). При этом звуковое поле, создаваемое когерентными лучами [2, 3], в морской среде будет определяться выражением

$$p(r) = p_0 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{R_i(\text{Re}l, \theta) \times e^{jkr_i}}{r_i},$$

где p_0 — звуковое давление, создаваемое источником звука на единичном расстоянии, Па; $R_i(\text{Re}l, \theta)$ — коэффициент отражения от границ морской среды для i -го мнимого источника; $\text{Re}l$ — параметр Рэлея, определяющий соотношение между длиной гидроакустической волны и среднеквадратическим значением возвышений отражающей поверхности; θ — угол скольжения падающей волны, градусы; k — волновое число излученного сигнала; r_i — расстояние от источника звука до точки поля для i -го мнимого источника, м.

Как показали экспериментальные исследования, сложившаяся интерференционная структура может изменяться как за счет переотражений от движущегося объекта в толще водной среды [2—4] (полезный сигнал при этом формируется на приемном гид-

рофоне при движении морского объекта в интерференционном поле морской среде), так и за счет отражения акустического сигнала от взволнованной поверхности моря.

На рис. 4 представлен принцип формирования акустического сигнала на приемном гидрофоне при переотражении сигнала от взволнованной морской поверхности.

На рис. 4. показано, что волнение водной поверхности приведет к флуктуациям размеров виртуальной антенны L_a , образованной излучателем акустического сигнала и его мнимым источником, возникающим при отражении от поверхности морской среды. При этом размер виртуальной излучающей антенны будет флуктуировать в пределах $L_a \pm h$, где h — среднеквадратическая высота гидродинамической волны морской поверхности. При этом зона Френеля (интерференционная зона) излучателя будет определяться глубиной его погружения, что определит местоположение мнимого источника звука и размеры виртуального излучателя.

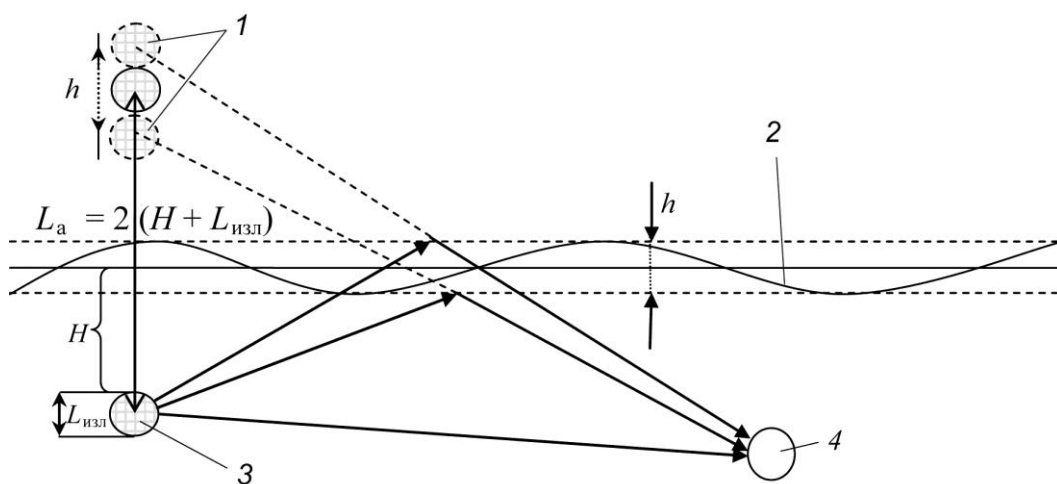


Рис. 4. Формирование сигнала на приемном гидрофоне при отражении излученного сигнала от взволнованной морской поверхности.

1 — мнимые источники, 2 — взволнованная морская поверхность, 3 — высокочастотный (ВЧ) излучатель, 4 — приемный гидрофон; h — среднеквадратическая высота гидродинамической волны морской поверхности, H — глубина погружения ВЧ излучателя, L_a — размер виртуальной антенны, $L_{изл}$ — размер ВЧ излучателя.

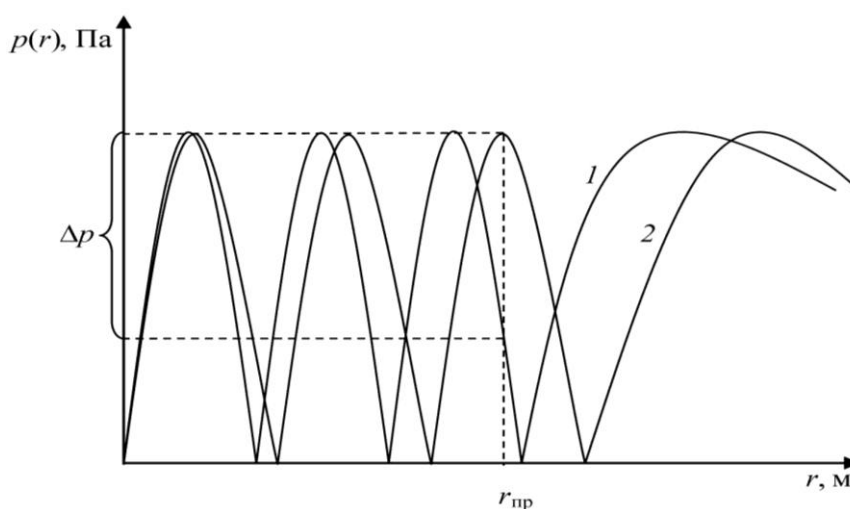


Рис. 5. К пояснению механизма возникновения амплитудных флуктуаций звукового давления на приемном гидрофоне, расположенном на расстоянии $r_{пр}$ от излучателя.

1 — для размера виртуального излучателя $L_a - h$; 2 — для размера виртуального излучателя $L_a + h$.

Это будет приводить к изменению звукового давления Δp на приемнике, расположенном на определенном фиксированном расстоянии $r_{пр}$ как это показано на рис. 5. Флуктуации размеров виртуального излучателя будут приводить к изменению распределения звукового давления с расстоянием. Так для размера виртуального излучателя L_a — h оценочное распределение звукового давления с расстоянием (для однородной среды) будет определяться кривой 1 (рис. 5); оценочное распределение же звукового давления с расстоянием для размера виртуального излучателя $L_a + h$ будет определяться кривой 2, показанной на рис. 5.

Таким образом, механизм возникновения амплитудной модуляции при отражении от колеблющейся морской поверхности с малым параметром Релея в интерференционной зоне (зоне Френеля) в отличие от возникновения амплитудной модуляции при отражении сигнала от колеблющейся поверхности, описанной в [10, 11], связан с формированием мнимых источников звука. Как видно из рис. 5, на приемном гидрофоне, расположенном на расстоянии $r_{пр}$ от излучателя звуковое давление будет изменяться в зависимости от размеров виртуального излучателя $L_a \pm h$ на величину Δp . Конкретные уровни флуктуаций звукового давления Δp в районе проведения эксперимента для различных расстояний можно оценить по рис. 2 и рис. 3, которое будет зависеть от глубины моря, глубины погружения гидрофона, волнения моря, отражающих свойств грунта, расстояния между приемным гидрофоном и излучателем и т. д. Поэтому в точке расположения приемного гидрофона при волнении отражающей поверхности моря появятся амплитудные флуктуации сигнала, представляющие модуляционную помеху.

Как показали экспериментальные исследования, эту помеху можно скомпенсировать с использованием принципов адаптивной фильтрации сигнала с использованием адаптивного фильтра типа LMS из блока DSP пакета расширения Simulink системы MATLAB.

Экспериментальные исследования проводились по разработанной методике в одной из мелководных бухт. Фациальный тип бухты — подводный береговой шельф. В вершине бухты (до глубины 5 м) ведущая фракция средних песков составляет 46—58 %. При экспериментальных исследованиях ненаправленный излучатель располагался на жесткой конструкции в точке Т1 на расстоянии 25 м от береговой черты водной акватории, а два приемных гидрофона, расположенные на расстоянии 80 м друг от друга в точках Т2 и Т3 принимали излученные гидроакустические сигналы. Используемая аппаратура излучающего и приемного трактов, в состав которой вошли излучатель 2-го поддиапазона, гидрофон 1-го поддиапазона, усилитель мощности из состава комплекта аппаратуры КИП-10, прошли соответствующую метрологическую поверку и располагались в лабораторном модуле на берегу бухты. Технические характеристики гидрофона: рабочий диапазон частот 0.3—20 кГц, минимальная чувствительность не менее 26 мкВ/Па. Технические характеристики излучателя: рабочий диапазон частот 12—30 кГц, минимальный уровень звукового давления, развиваемого излучателем на расстоянии 1 м при напряжении 1 В на средней частоте поддиапазона 19 кГц—0.6 Па, угол раствора характеристики направленности в вертикальной плоскости — 16° , активная высота излучаемой поверхности — 18 см.

Схема проведения экспериментальных исследований, места установки излучателя и приемников и маршрут движения пловца представлены на рис. 6.

Предполагалось, что на одном гидрофоне производилась запись фонового сигнала без наличия в его районе движущегося объекта. При этом излученный сигнал после отражения от поверхности воды принимался приемными гидрофонами, после чего детектировался амплитудным детектором. При проведении исследований с целью изучения влияния параметра Релея на пространственно-корреляционные связи акустического сигнала одновременно излучались непрерывные тональные высокочастотные (ВЧ) сигналы на частотах 10; 15 и 20 кГц. Для измерения среднеквадратического значения высоты взволнованной поверхности моря в бухте был установлен волномер, который позволял производить замеры высоты волнения моря от 0.01 до 0.5 м с погрешностью 7 %.

Экспериментальные исследования предполагали фоновую запись с выхода амплитудных детекторов двух приемных преобразователей при отсутствии движущегося подводного объекта в озвученной зоне морского пространства. Затем подводный объект входил в область одного из гидрофонов, второй в это время давал информацию о помехе. После записи сигналов с двух гидрофонов в отдельные файлы производилась их обработка с использованием разработанной схемы, в основе которой был использован адаптивный фильтр из блока DSP пакета расширения Simulink системы MATLAB.

Общая структура адаптивной системы показана на рис. 7. В адаптивном фильтре входной дискретный сигнал $x(k)$ после преобразования АЦП обрабатывается дискретным фильтром, в результате чего выходной сигнал $y(k)$ сравнивается с образцовым сигналом $d(k)$, разность между ними образует сигнал ошибки $e(k)$.



Рис. 6. Схема проведения экспериментальных исследований.
1 — излучатель, 2 — первый приемный гидрофон, 3 — второй приемный гидрофон.

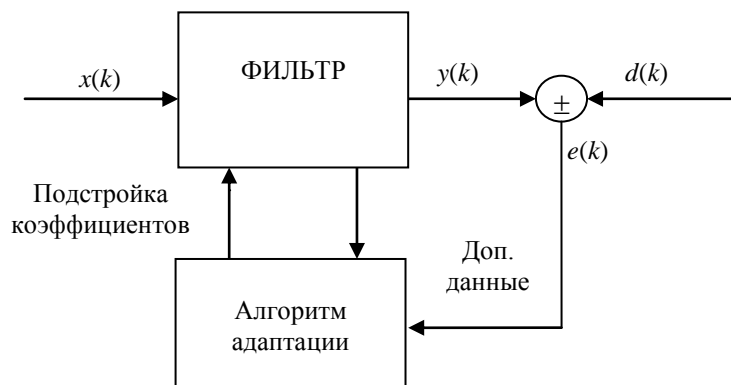


Рис. 7. Общая структура адаптивной системы.
 $x(k)$ — входной дискретный сигнал; $y(k)$ — выходной сигнал; $d(k)$ — образцовый сигнал; $e(k)$ — сигнал ошибки.

Общий подход к решению задачи оптимальной компенсации разработан на основе трансверсального фильтра, использующего линию задержки с отводами и регулируемые весовыми коэффициентами. Адаптивный фильтр, использующий опорный сигнал помехи, построен так, что выходной с фильтра сигнал сравнивается с образцовым сигналом, разность между ними образует сигнал ошибки. Задача адаптивного фильтра — минимизировать ошибку. С этой целью блок адаптации после обработки каждого отсчета анализирует сигнал ошибки, поступающие из фильтра, используя результаты этого анализа для подстройки параметров (коэффициентов) фильтра. Необходимо найти такие коэффициенты фильтра, которые обеспечивают максимальную близость выходного сигнала фильтра к образцовому, то есть минимизируют ошибку. Но поскольку ошибка также является случайным процессом, в качестве меры ее величины принимается средний квадрат. В результате такой обработки осуществляется синхронная компенсация помехи повышенного уровня в процессе измерения полезного сигнала.

Эту задачу могут реализовать алгоритмы минимизации градиента мгновенного значения ошибки между образцовым и входным сигналом при использовании метода наименьших квадратов реализованные в адаптивном нерекурсивном фильтре. Статистический подход в сочетании с методом градиентной оптимизации дает алгоритм LMS. Вывод формул, описывающих данные алгоритмы, производится на основе уравнений оптимальной фильтрации сигнала [6].

В данных условиях сигнально-помеховой обстановки нерекурсивный фильтр типа LMS позволил скомпенсировать помеху и повысить соотношение сигнал/помеха по сравнению с рекурсивным фильтром типа RLS.

Результаты экспериментальных исследований при регистрации прохода подводного пловца представлены на рис. 8.

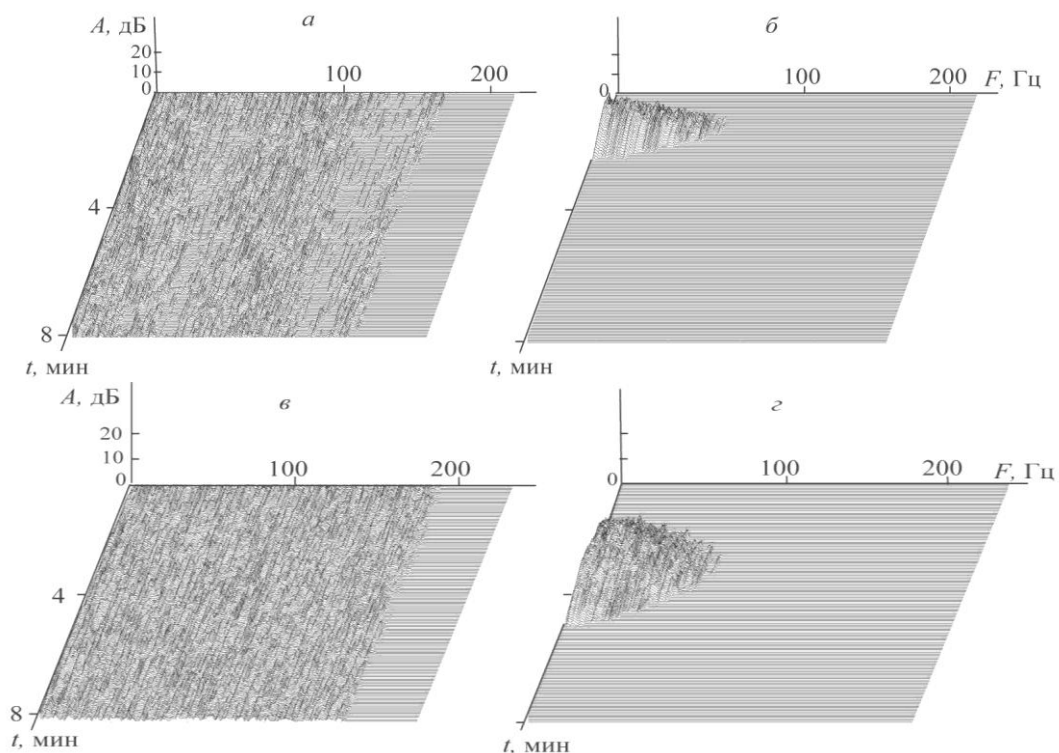


Рис. 8. Спектрограммы в 3D формате сигнала на выходе схемы обработки при обнаружении пловца (частота излучения сигнала 10 кГц).

а, в — до обработки излученного сигнала; б — после обработки излученного сигнала с выхода первого гидрофона; г — после обработки излученного сигнала с выхода второго гидрофона.

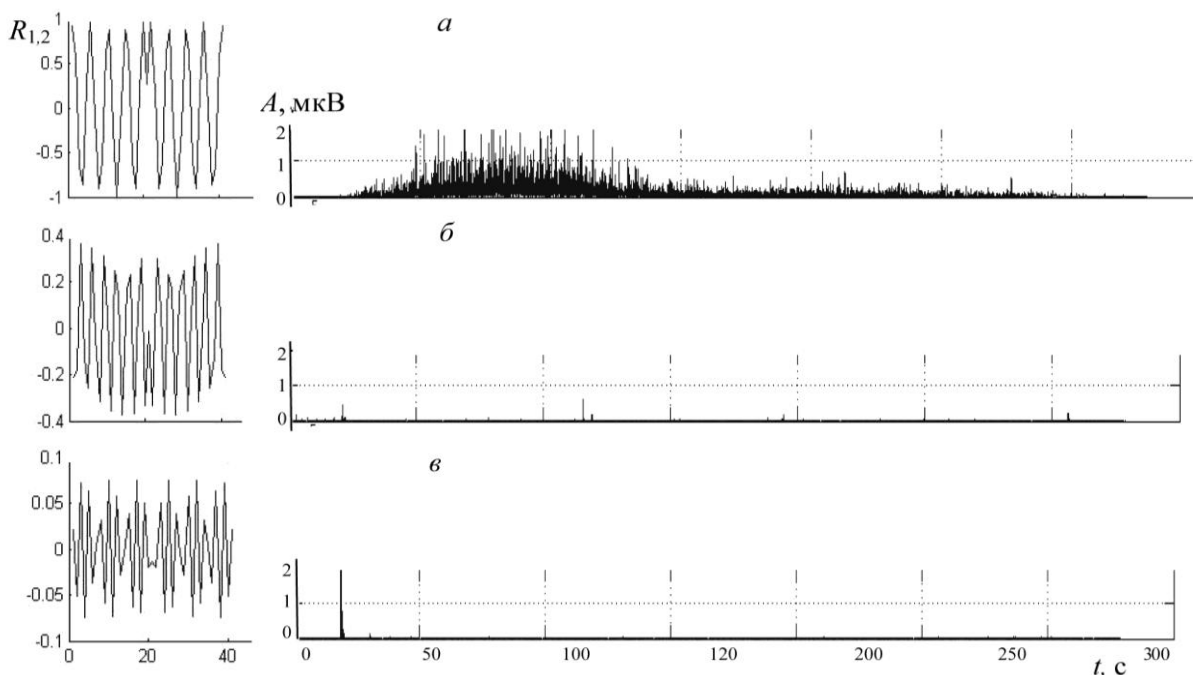


Рис. 9. Нормированные функции взаимной корреляции по помехе и амплитудно-временные диаграммы прохода пловца с выхода одного из приемных гидрофонов. *a* — на частоте излучения 10 кГц; *б* — на частоте излучения 15 кГц; *в* — на частоте излучения 20 кГц.

На рис. 8 видно, что адаптивная обработка принятого гидрофоном сигнала позволяет выделить проход подводного пловца на фоне помехи, возникающей при отражении сигналов от взволнованной поверхности. Следует отметить, что при выработке сигнала ошибки в адаптивном фильтре большую роль играют статистические свойства входных акустических сигналов, которые определяются как частотой излучения, так и условиями их распространения в морской среде.

Для исследования зависимости эффективности регистрации прохода пловца на фоне взволнованной поверхности водной акватории в зависимости от частоты излучения были произведены вычисления корреляционных связей между принятыми сигналами двумя гидрофонами.

На рис. 9 представлены результаты измерения нормированной функции взаимной корреляции $R_{1,2}$ сигналов, принятого 1-м и 2-м гидрофоном на различных частотах излучения (10; 15 и 20 кГц) в условиях отсутствия прохода пловца при повышенном уровне волнения в водной акватории (высота волны — 15 см), а также результаты обработки излученных сигналов (частотой 10, 15 и 20 кГц) при проходе пловца в условиях повышенного волнения. Как видно из рисунка, при излучении сигнала частотой 10 кГц периодически изменяющаяся величина амплитуды нормированной функции взаимной корреляции $R_{1,2}$ между сигналами, записанными с двух гидрофонов в условиях отсутствия прохода пловца по абсолютной величине, близка к единице. На этой частоте происходит выделение сигнала от прохода подводного объекта (рис. 9, *a*).

При низком уровне нормированной функции корреляции по абсолютной величине, которая наблюдается на частотах 15 и 20 кГц, сигнал от прохода пловца не был зарегистрирован. Низкая амплитуда нормированной функции взаимной корреляции по абсолютной величине на частотах излучения 15 и 20 кГц может быть объяснен высоким параметром Рэля для этих частот, характеризующим соотношение длин волн — излученной гидроакустической и гидродинамической волны морской поверхности. Если параметр Рэля большой, как это наблюдалось при проведении данного эксперимента для частот 15 и 20 кГц, то отраженный гидроакустический сигнал от взволнованной по-

верхности водной акватории будет характеризоваться в основном рассеянной составляющей (поверхность водной акватории нельзя считать гладкой). Отсутствие когерентной составляющей в отраженном от поверхности воды сигнала не позволит создать интерференционную картину, а также затруднит подавление некоррелированной помехи адаптивным фильтром. Это, как видно на рис. 9, приводит к неэффективности предложенного метода регистрации прохода движущегося объекта на определенных частотах излучения. Так, экспериментально было получено, что при незначительном волнении с высотой взволнованной поверхности ниже 11 см и периодически изменяющейся величиной амплитуды нормированной функции взаимной корреляции по абсолютной величине между гидрофонами на трех частотах излучения — 10, 15, 20 и 21 кГц близкой к единице, а также рассчитанными значениями параметров Рэлея для всех частот $Rel < 1$, сигнал от прохода пловца фиксировался на всех трех частотах излучения [5].

Обнаружение сигнала сводится к принятию решения о наличии или отсутствии полезного сигнала (цели). Поскольку прием полезного сигнала происходит в присутствии помех, затрудняющих процесс принятия решения, задача обнаружения является статистической, а решение принимается с той или иной вероятностью, определяющей качество обнаружения [12, 13].

На рис. 10 представлена реализация, полученная на выходе тракта обработки выходного процесса одного из гидрофонов, на которой выбран участок 1, где явно проявляются амплитудные флуктуации сигнала, обусловленные движением пловца (смесь сигнала и помехи) и участок 2, где этих амплитудных флуктуаций нет (помеха).

Из полученных участков были сформированы выборки. Дальнейшая обработка, полученных выборок из помехи и смеси сигнала и помехи, предполагала определение функции плотности распределения этих выборок, и проверку согласованности найденной функции, теоретической плотности распределения.

Для проверки соответствия плотности распределения, полученной по данным выборок, с некоторой теоретической плотностью распределения был применен критерий Колмогорова—Смирнова, и произведен расчет по разработанному алгоритму. Результаты показали, что полученные выборки амплитудных флуктуаций сигнала распределены, по закону Рэлея при заданном уровне значимости с вероятностью 95 %. На рис. 11 показаны гистограммы распределения выборок амплитудных флуктуаций помехи и смеси сигнала с помехой. Порог обнаружения выбран по критерию Неймана—Пирсона с заданной вероятностью ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-7}$.

Из рис. 11 видно, что при проведении эксперимента в морских условиях вероятность правильного обнаружения составила 0.89 (при вероятности ложной тревоги 10^{-7}), что говорит о высокой эффективности предложенного метода обнаружения подводного объекта в сложных условиях интерференционной структуры акустического поля, возникающего в мелководных прибрежных районах.

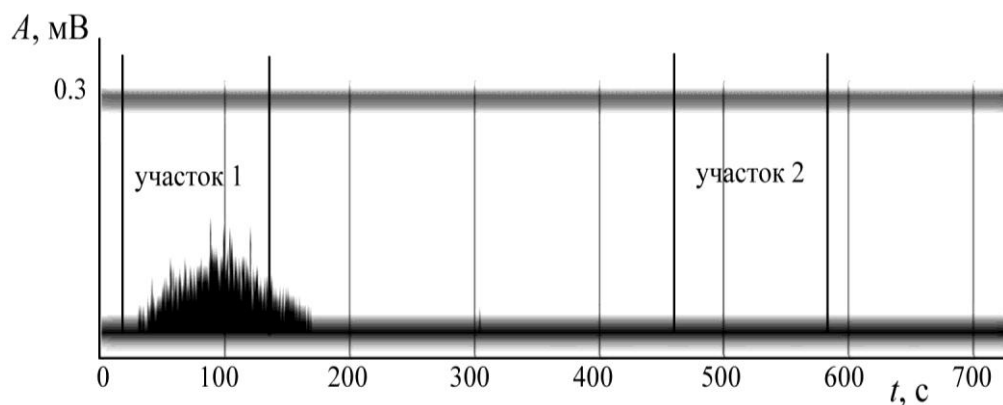


Рис. 10. Амплитудно-временная диаграмма сигнала после схемы обработки.

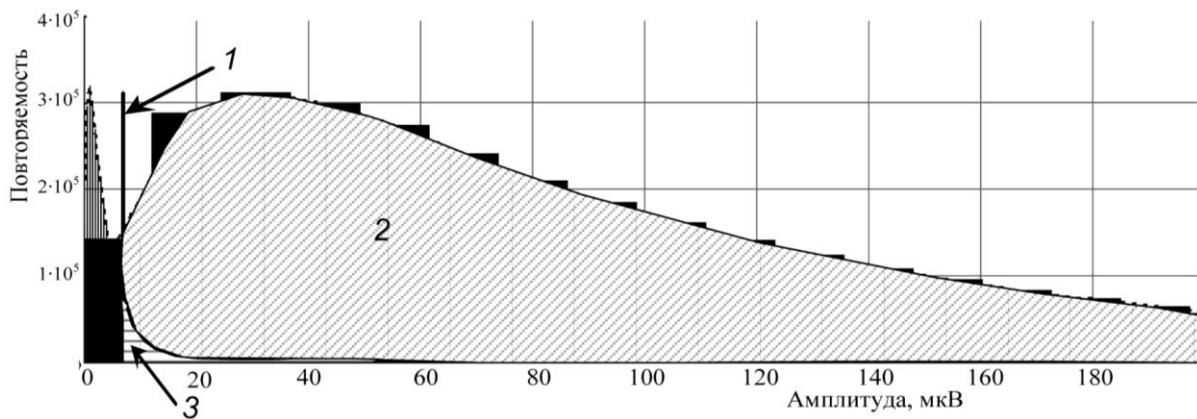


Рис. 11. Гистограммы распределения выборок амплитудных флуктуаций помехи и смеси сигнала с помехой с одного из гидрофонов.

1 — пороговый уровень, U_0 ($U_0 = 7.12$ мкВ); 2 — вероятность правильного обнаружения, $P_{по}$ ($P_{по} = 0.89$); 3 — вероятность ложной тревоги, Рлт (Рлт = 10^{-7}).

Таким образом, как показали исследования, интерференционный обнаружитель позволяет регистрировать движущейся подводный объект на основе компенсации модуляционной составляющей отраженного от взволнованной морской поверхности гидроакустического сигнала с использованием принципов адаптивной фильтрации в условиях развитой интерференционной структуры акустического поля мелководной акватории.

Литература

1. Пат. 2130646 Российская Федерация, МПК G08B13/24. Способ обнаружения объектов в контролируемой зоне / Трефилов Н. А.; Николаенко В. А.; Шеремето Ю. Ю.; Елягин С. В.; Маргелов А. А.; заявитель и патентообладатель «Ульяновский государственный технический университет». № 96102925/09; заявл. 15.02.1996; опубл. 20.05.1999.
2. Справочник по гидроакустике / Евтютов А. П., Колесников А. Е., Корепин Е. А. и др. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1988. 552 с.
3. Тюрин А. М. Теоретическая акустика. Л.: ВМА, 1971. 444 с.
4. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т. 1: Оптимальные методы. СПб.: «ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 400 с.
5. Колмогоров В. С., Калашиников И. И., Сенченко А. Г. Использование адаптивного фильтра в охранной системе интерференционного типа при обнаружении движущегося подводного объекта // Специальная техника. 2008. № 1. С. 14—17.
6. Колмогоров В. С. Гетеродинные методы обработки гидроакустических сигналов в задачах освещения ближней обстановки. Владивосток: ТОВМИ, 2009. 204 с.
7. Пат. 2474881, Российская Федерация, МПК G08B3/10. Интерференционный обнаружитель движущегося подводного объекта / Колмогоров В. С., Долгих В. Н., Викторов Р. В., Шпак С. А., Плюхин В. В., Ламека А. П.; заявитель и патентообладатель ОАО «ДАЛЬПРИБОР». № 2011134154/08; заявл. 12.08.2011; опубл. 10.02.2013.
8. Викторов Р. В., Колмогоров В. С., Кречетов Д. Г., Плюхин В. В., Черкашин Ю. В. Адаптивная фильтрация сигнала при регистрации прохода подводного пловца // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 44—49.
9. Уидроу Б., Стринз С. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006. 752 с.
11. Авилов К. В. Программный комплекс РПЗЭМС, Науч.-технич. центр «Модуль» / Сб. программ «Программные средства расчета характеристик канала распространения звука в морской среде», составитель Зиняков Ю.Н. М.: РТУ ВМФ, 2003.
12. Колмогоров В. С., Крючков А. Н. Экспериментальная проверка метода адаптивной компенсации виброакустической помехи // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 58—64.
13. Колмогоров В. С., Крючков А. Н. Амплитудная модуляция в параметрических антеннах реверберационного типа // Акустический журнал. 2009. № 3. С. 388—394.
14. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 679 с.
15. Евтютов А. П., Митько В. Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.

