УДК 621.396.96

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В.С. Колмогоров, Р.В. Викторов

Тихоокеанский военно-морской институт им. С.О. Макарова, (филиал ФГВОУ ВПО Военный учебно-научный центр военно-морского флота «Военно-морская академия им. адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»), г. Владивосток

Рецензент д-р техн. наук, профессор П.А. Стародубцев

Ключевые слова и фразы: адаптивный фильтр; амплитудная модуляция; детектор; зона Френеля; интерференционное поле; обнаружение объекта; экспериментальные исследования.

Аннотация: Рассмотрена возможность использования адаптивной фильтрации при мониторинге морской среды. Приведены результаты экспериментов в гидроакустическом бассейне и в морских условиях по выделению сигнала с использованием адаптивного фильтра.

Как показано в [1] к одной из проблем, требующих решения в настоящее время, следует отнести проблему охраны подводных объектов, к которым относятся объекты нефтедобычи, гидронавтики, объекты по выращиванию аквакультур и т.д. Охрана объектов, таких как АЭС, прилегающих к водным акваториям, также требует освещения подводной обстановки. Использование традиционных гидролокационных средств для решения этой задачи в условиях мелкого моря затруднено из-за повышенной реверберационной помехи. Поэтому необходимо искать новые способы освещения подводной обстановки в условиях сложной интерференционной структуры акустического поля в мелком море.

Известны устройства использующие принцип обнаружения движущегося объекта по нарушению сложившийся интерференционной картины, созданной путем излучения акустических или электромагнитных волн в замкнутых пространствах, таких как салон автомобиля, охраняемого

Колмогоров Владимир Степанович – доктор технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры «Гидроакустика», e-mail: vlkolmogorov@yandex.ru; Викторов Руслан Викторович – аспирант кафедры «Гидроакустика», ТОВМИ им. С.О. Макарова, г. Владивосток.

строительного помещения и т.п. Такие охраняемые объекты имеют стационарные, неподвижные границы [2]. Использование этого принципа в морских условиях затруднено, поскольку в водной среде поверхность моря имеет весьма изменчивую во времени форму и статистически неоднородна.

Если в сложившуюся интерференционную картину поместить отражающий движущийся объект, на выходе приемника будут наблюдаться амплитудные флюктуации сигнала за счет изменения сложившийся интерференционной картины [3], что адекватно амплитудной модуляции сигнала в точке приема.

Для подтверждения этого явления были проведены эксперименты в гидроакустическом бассейне с организацией просветных методов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Экспериментальная установка для проведения исследований в гидроакустическом бассейне представлена на рис. 1.

При проведении экспериментов в гидроакустическом бассейне, модель приводилась в движение с помощью электродвигателя и протяжного механизма. При этом излученный сигнал, после отражения от поверхности воды, принимался приемником и детектировался амплитудным детектором. Аналогичная установка использовалась при организации просветного метода в горизонтальной плоскости.

При движении модели в горизонтальной плоскости в интерференционном поле на выходе амплитудного детектора стабильно наблюдалось изменение сигнала (рис. 2). При вертикальном перемещении пластины будет наблюдаться аналогичная картина [4].

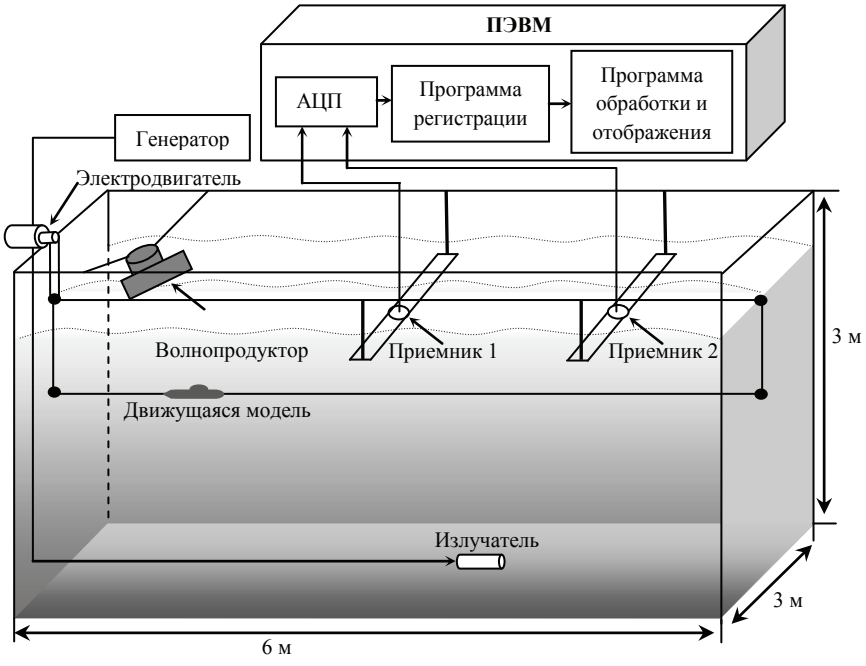

Рис. 1. Схема экспериментальной установки в гидроакустическом бассейне

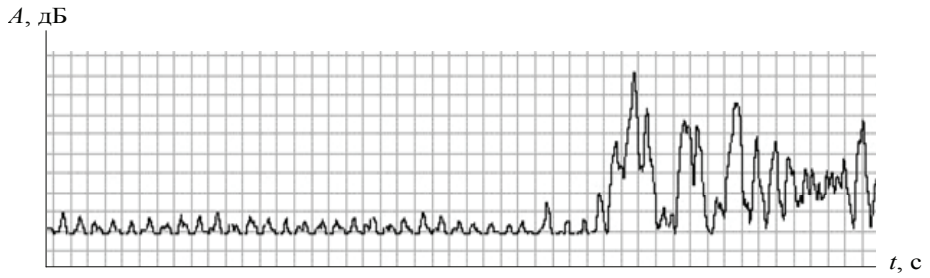

Рис. 2. Сигнал с выхода приемника после амплитудного детектора при протяжке модели в гидроакустическом бассейне при спокойной воде

При физическом моделировании в гидроакустическом бассейне с помощью волнопродуктора имитировалось «волнение» водной поверхности, при этом полезный сигнал не наблюдался – он был «зашумлен» появлением модуляции от взволнованной поверхности (рис. 3, *а*, *б*). Поэтому использование принципа, изложенного выше, в морских условиях невозможно без использования адаптивной фильтрации сигнала.

На рис. 3 показан сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований с движущейся моделью при наличии взволнованной водной поверхности бассейна без использования адаптивного фильтра (см. рис. 3 *а*, *б*) на двух разнесенных в пространстве приемниках, один из которых был «фоновым», и с использованием адаптивного фильтра типа LMS (Least Mean Square) из блока DSP (Digital Signal Processor) пакета расширения Simulink системы MATLAB (см. рис. 3, *в*).

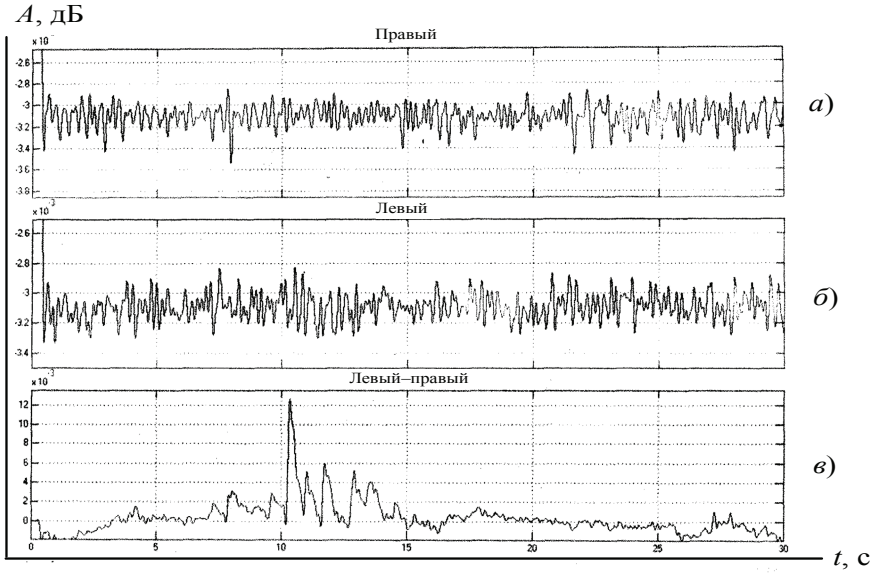

Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований при протяжке движущейся модели в гидроакустическом бассейне при взволнованной поверхности воды:
а, *б* – сигналы с выхода приемных преобразователей при протяжке модели на фоне взволнованной поверхности бассейна; *в* – сигнал после обработки с использованием адаптивного фильтра при протяжке модели на фоне взволнованной водной поверхности бассейна

Как видно на рис. 3, *в*, использование адаптивного фильтра и амплитудного детектора позволяет выделить сигнал, вызванный изменением интерференционной картины акустического поля движущимся объектом в условиях наличия взволнованной водной поверхности бассейна.

Экспериментальная проверка возможности мониторинга с использованием данных, полученных в морских условиях. Аналогичные экспериментальные исследования были проведены в морских условиях с использованием двух приемных преобразователей и измерением взаимокорреляционной функции. Обработка сигналов производилась с использованием нерекурсивного фильтра типа LMS, основанного на минимизации градиента мгновенного значения ошибки между входным сигналом и сигналом помехи при использовании метода наименьших квадратов [5].

Результаты морских натурных экспериментальных исследований при проходе корабля в озвученной области моря показаны на рис. 4.

Экспериментальные исследования предполагали фоновую запись с выхода амплитудных детекторов двух приемных преобразователей при отсутствии движущегося корабля в озвученной зоне морского пространства (см. рис. 4 *а*, *б*). Затем корабль входил в озвученную область и в это время производилась запись на фоне взволнованной поверхности (см. рис. 4 *в*, *г*). После этих записей производилась обработка сигналов с использованием адаптивного фильтра.

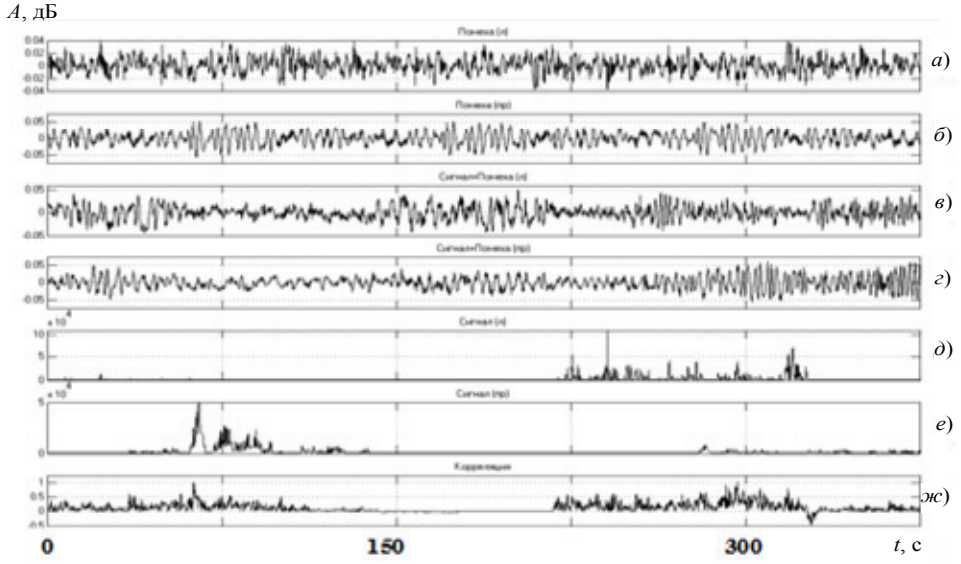

Рис. 4. Результаты морских натурных экспериментальных исследований с использованием двух приемных преобразователей:
а, *б* – фоновая запись с выхода амплитудного детектора (помеха); *в*, *г* – запись сигнала с выхода амплитудного детектора при проходе корабля в озвученной области моря на фоне взволнованной поверхности; *д*, *е* – запись сигнала с выхода схемы обработки с использованием адаптивного фильтра при проходе корабля в озвученной области моря; *ж* – нормированная взаимокорреляционная функция между приемными преобразователями, разнесенными в пространстве

Как видно на рис. 4 использование адаптивного фильтра позволяет выделить сигнал в виде амплитудных флюктуаций от двужущейся цели на фоне взволнованной поверхности моря, при этом коэфициент пространственной взаимокорреляционной функции двух приемников близок к единице, что в переспективе позволит повысить эффективность метода за счет корреляционной обработки сигналов.

На формирование поля в морской среде будут влиять лучи, отраженные от поверхности воды, которые вносят паразитную амплитудную модуляцию от колеблющейся поверхности. Очевидно, что использование схемы обработки с использованием адаптивного фильтра будет зависеть от характера модуляции (фазовая или амплитудная).

Как показано в работе [6], отражающая поверхность, помещенная в зону Френеля (интерференционная зона) излучателя, будет создавать ярко выраженную амплитудную модуляцию отраженного сигнала, которая в экспериментах превалировала над другими видами модуляции. При этом зона Френеля определяется размерами излучателя, которые могут быть увеличены за счет появления мнимых источников звука.

Поэтому интерференционная зона формируется как непосредственно от источника излучения, так и за счет появления мнимых источников излучения при отражении сигнала от границ и, в частности, от поверхности моря. На рис. 5 приведен пример расчета с использованием программы РПЗЭМС [7] точечного источника звука, помещенного в морской волновод.

В общем случае звуковое давление p в каждой точке акустического поля морской среды можно рассматривать как суперпозиции прямых и отраженных от границ акустических волн и рассчитать с использованием мнимых источников, образованных за счет отражения от границ морской

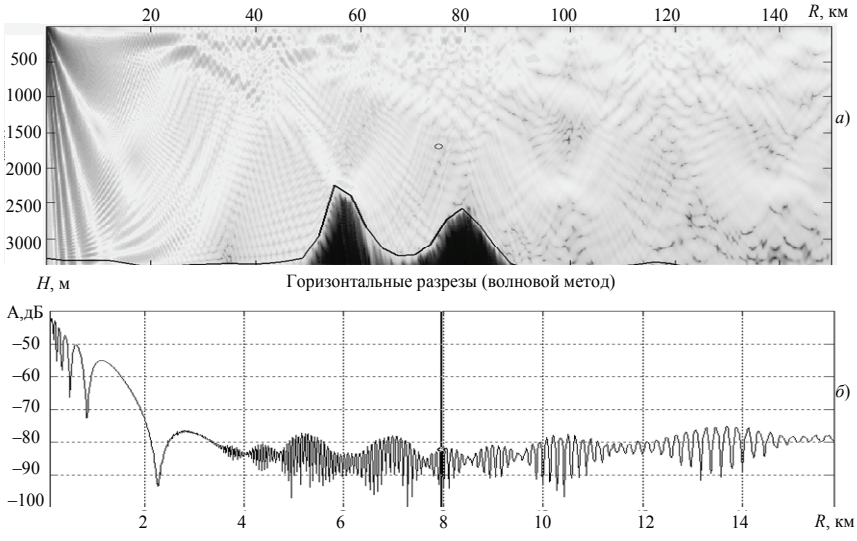

Рис. 5. Волновой расчет акустического поля (источник точечный H = 100 м, F = 60 Гц, приемник точечный):
а – до дистанции 150 км; *б* – горизонтальный разрез до дистанции 16 км

среды (поверхность и дно моря). При этом когерентное звуковое поле, определяющее возникновение интерференции в морской среде, будет определяться выражением

$$p(r) = p_0 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{R_i(\mathrm{Rel},\theta)\mathrm{e}^{jkr_i}}{r_i},$$

где p_0 – звуковое давление, создаваемое источником звука на единичном расстоянии, Па; R_i(Rel, θ) – коэффициент отражения от границ морской среды для i-го мнимого источника; Rel – параметр Релея; θ – угол скольжения падающей волны, град; k – волновое число излученного сигнала, рад/м; r_i – расстояние от источника звука до точки поля для i-го мнимого источника, м.

Следует отметить, что появление модуляции, наблюдаемой при проведении экспериментальных исследований, подтверждается в работах [8, 9]. Но, как показано в [10], появление модуляции в «просветных» методах не связано с нелинейными эффектами, на что ссылаются авторы данных работ, а может быть объяснено интерференционными явлениями в морском волноводе.

Таким образом, использование адаптивной фильтрации при создании охранной системы интерференционного типа подводного объекта позволит «отстроится» от фоновых помех и обнаружить подводный движущийся объект в контролируемой зоне. При этом сложившаяся интерференционная структура может изменяться как за счет движущегося объекта в морской среде, так и и за счет взволнованной поверхности моря, что подтверждает единый механизм возникновения амплитудной модуляции сигнала и помехи. Это позволяет, как показали экспериментальные исследования, проведенные в гидроакустическом бассейне и в морских условиях, эффективно использовать нерекурсивные адаптивные фильтры типа LMS .

Список литературы

1. Звежинский, С.С. Возможности новых магнитометрических средств обнаружения для охраны гражданских и военных объектов / С.С. Звежинский // Спец. техника. – 2004. – № 6. – С. 5–8.

2. Пат. 2124232 Российская Федерация, МПК G08B13/24. Устройство для тревожной сигнализации / Трефилов Н.А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Ульян. гос. техн. ун-т. – № 2130646 ; заявл. 15.02.1996 ; опубл. 27.12.1998, Бюл. № 08/2002. – 126 с.

3. Пат. 68733 Российская Федерация, МПК G08B3/00(2006.01), G08B31/00(2006.01). Устройство обнаружения движущегося морского объекта / Колмогоров В.С. [и др.] ; заявитель и патентообладатель Тихоокеан. Военно-морск. ин-т. – № 68733 ; заявл. 03.15.2007 ; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33. – 120 с.

4. Колмогоров, В.С. О возможности использования адаптивного фильтра в охранной системе интерференционного типа при обнаружении движущегося подводного объекта / В.С. Колмогоров, И.И. Калашников, А.Г. Сенченко // Спец. техника. – 2008. – № 1. – С. 14–17.

5. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 752 с.

6. Колмогоров, В.С. Экспериментальная проверка метода адаптивной компенсации виброакустической помехи / В.С. Колмогоров, А.Н. Крючков // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 1. – С. 58–64.

7. Авилов, К.В. Программный комплекс РПЗЭМС. Научно-технический центр «Модуль» / К.В. Авилов // Программные средства расчета характеристик канала распространения звука в морской среде : сб. программ / сост. Ю.Н. Зиняков. – М., 2003. – С. 125–148.

8. Мироненко, М.В. Параметрическая томография морских акваторий с низкочастотной подсветкой среды / М.В. Мироненко, П.А. Стародубцев, Н.Я. Юденок // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ : сб. ст. – Владивосток, 2001. – Вып. 32. – С. 281–298.

9. Мироненко, М.В. Закономерности амплитудно-фазовой модуляции низкочастотных акустических волн инфранизкочастотными при их совместном распространении и взаимодействии в морской среде / М.В. Мироненко, И.Н. Сургаев, С.В. Шостак // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ : сб. ст. – Владивосток, 2001. – Вып. 32. – С. 289–296.

10. Колмогоров, В.С. Адаптивная фильтрация сигнала при мониторинге морской среды / В.С. Колмогоров, И.И. Калашников, А.Г. Сенченко // Вест. компьютер. и информ. технологий. – 2009. – № 4. – С. 20–25.

Interference Detector of Moving Underwater Object Using Adaptive Filtration

V.S. Kolmogorov, R.V. Viktorov

Pacific Naval Institute named after S.O. Makarov (Affiliate of Naval Training Research Center "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov"), Vladivostok

Key words and phrases: adaptive filter; amplitude modulation; detector; experimental studies; field of interference; Fresnel zone; object detection.

Abstract: The paper studies the possibility of using an adaptive filtration in the course of sea environment monitoring. The results of the experiments both in hydro acoustic pool and in sea conditions on detecting a signal using an adaptive filter are presented.

© В.С. Колмогоров, Р.В. Викторов, 2011