

**Р.В. Викторов, В.С. Колмогоров, А.В. Омельченко, В.В. Плюхин, С.А. Шпак**  
(филиал ВУНЦ ВМФ "Военно-морская академия имени Адмирала Советского союза  
Н.Г. Кузнецова (филиал, г. Владивосток); e-mail: vkolmogorov@yandex.ru)

## **АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ПОДВОДНОГО ПЛОВЦА В МЕЛКОВОДНОМ ПРИБРЕЖНОМ ОХРАНЯЕМОМ РАЙОНЕ**

*Предлагается метод обнаружения подводного пловца по изменениям акустического поля. Приведены результаты экспериментов в морских условиях по выделению гидроакустического сигнала с использованием адаптивного фильтра.*

*Ключевые слова: терроризм, адаптивный фильтр, обработка гидроакустического сигнала, обнаружение, подводный пловец.*

**R.V. Viktorov, V.S. Kolmogorov, A.V. Omelchenko, V.V. Pljuhin, S.A. Shpak**  
**ADAPTIVE PROCESSING OF THE HYDROACOUSTIC SIGNAL  
AT DETECTION OF THE UNDERWATER SWIMMER  
IN SHALLOW COASTAL PROTECTED AREA**

*The method of detection of the underwater swimmer on changes of acoustic field is proposed. Results of experiments in sea conditions on allocation of a hydroacoustic signal with use of the adaptive filter are given.*

*Key words: terrorism, the adaptive filter, processing of the hydroacoustic signal, detection, the underwater swimmer.*

Одной из актуальных проблем сегодняшнего дня является "морской терроризм" – теракты, направленные против транспортных средств и инфраструктуры со стороны моря. В настоящее время различные террористические и экстремистские группировки приняли на вооружение тактику действий и методы подготовки подводно-диверсионных сил и средств (ПДСС) развитых стран. В современных условиях с целью диверсий на территории охраняемых объектов широко используются подводные пловцы.

Как показывает практика, наиболее эффективными средствами обнаружения ПДСС являются гидроакустические. При движении на ластах пловцы практически не имеют шумоизлучения.

Обнаружение же боевого пловца в активном режиме работы *гидроакустического средства (ГАС)* затруднено из-за высокого уровня донной и поверхностной ревербераций, а также интенсивного затухания сигнала в мелководных районах. Поэтому область освещения подводной обстановки, существующими ГАС ПДСС ограничена изобатой 10 м, которая может отстоять от прибрежной кромки водной акватории на расстоянии до несколько сотен метров. При этом площадь прибрежной зоны, ограниченная глубинами менее 10 м, где использование активных гидролокационных средств неэффективно, может составлять до 50 % от общей площади охраняемой акватории.

На практике подводные диверсанты неоднократно успешно выполняли задачи по уничтожению охраняемых объектов прибрежного базирования, беспрепятственно проникая через охранные системы подводного наблюдения. 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 низка из-за повышенного уровня маскирующей помехи, возникающей при отражении 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.

Известны объёмные датчики движения, использующие принцип обнаружения движущегося объекта по нарушению сложившейся интерференционной картины движущимся объектом.

В таких датчиках интерференционная структура акустического или электромагнитного поля возникает от соответствующего излучения в замкнутых пространствах (салон автомобиля, строительное помещение и т.п.) за счёт многократных отражений излученного сигнала от стационарно закреплённых неподвижных границ охраняемого пространства [1].

Реализация данного способа в морских условиях затруднена из-за того, что поверхность моря, являясь границей водного района, имеет весьма изменчивую во времени форму и статистически неоднородна. Поэтому излученный гидроакустический сигнал при отражении от колеблющейся поверхности создает в точке расположения приемника флуктуирующее фоновое поле, затрудняющее использование принципа объёмного датчика движения в морских условиях.

Как показали экспериментальные исследования, реализация принципа объёмного датчика движения в морских условиях возможна с использованием принципов адаптивной фильтрации [2, 3]. При этом возможно использование адаптивного нерекурсивного фильтра типа LMS (Least Mean Square) из блока DSP-пакета расширения Simulink системы MATLAB, основанного на минимизации градиента мгновенного значения ошибки между образцовым и входным сигналами [4].

При излучении дополнительного **высокочастотного (ВЧ)** сигнала суммарное поле в водной среде формируется в результате отражения от взволнованной морской поверхности и дна моря, как это показано на рис. 1.

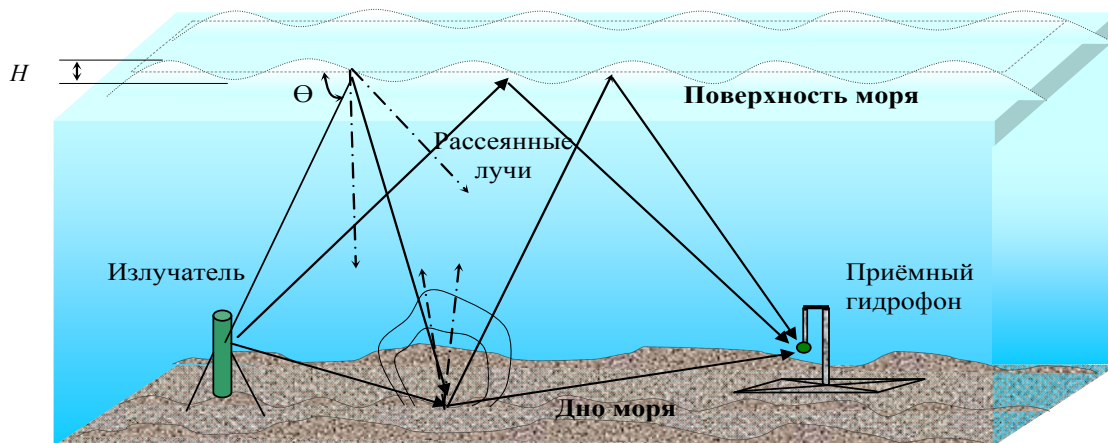
Сигналы при многократном отражении от морской поверхности и дна создают развитую интерференционную структуру акустического поля, возникновение которой возможно при малом значении параметра Релея, определяемого выражением:

$$Re l = 2\pi H \sin \theta / \lambda ,$$

где  $H$  – высота гидродинамической волны водной поверхности;

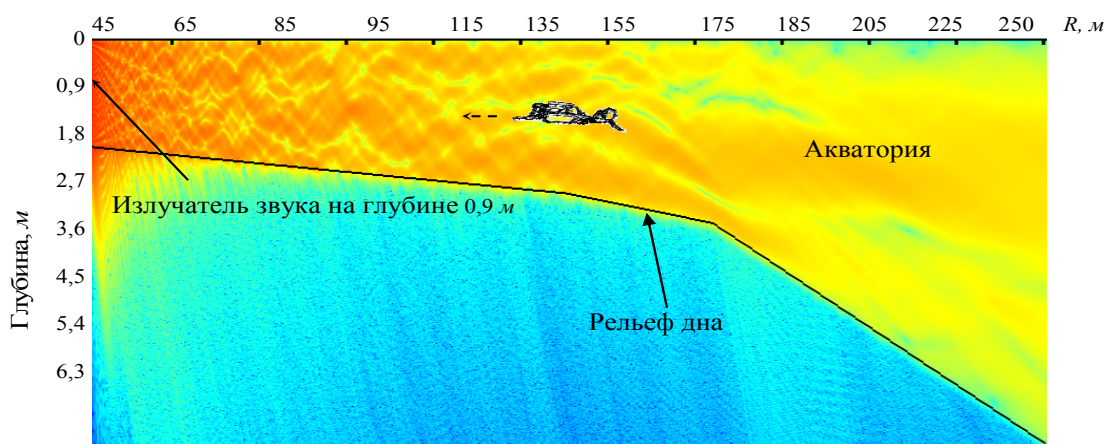
$\lambda$  – длина излучённой гидроакустической волны;

$\theta$  – угол скольжения падающей волны.



**Рис. 1.** Схема формирования акустического поля на приёмном гидрофоне

Для анализа акустического поля точечного источника звука, помещённого в прибрежный морской волновод, были произведены расчёты для мелководного района до дистанции 250 м, который показал, что в шельфовой зоне при излучении высокочастотного сигнала возникает интерференционная структура акустического поля, как показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Расчёт акустического поля для мелководного района до дистанции 250 м (источник звука точечный, дистанция от берега 45 м,  $F = 20$  кГц)

Волновой расчёт акустического поля с использованием псевдодифференциальных параболических уравнений [5] производился на частотах, необходимых для обнаружения биологических объектов с малыми волновыми параметрами, к которым можно отнести подводного пловца. В случае, если в эту сложившуюся интерференционную структуру поместить движущийся объект, на выходе приёмника будут наблюдаться амплитудные флюктуации сигнала за счёт изменения сложившейся интерференционной картины, что адекватно амплитудной модуляции излученного гидроакустического сигнала. При этом сложившаяся интерференционная структура может изменяться как за счёт движущегося объекта в толще морской среды, так и за счёт отражения

ВЧ-сигнала от взволнованной поверхности моря, что подтверждает единый механизм возникновения амплитудной модуляции сигнала и помехи [6]. Целью и новизной поведённой авторами работы является исследование возможности и эффективности обнаружения подводного пловца, обладающего малой отражающей способностью по сравнению с подводным транспортным средством (результаты обнаружения которого рассмотрены в [2, 3]), в реальных условиях морского волновода.

### Результаты экспериментальных исследований

Для исследования возможности обнаружения подводного пловца в реальных морских условиях были проведены эксперименты в мелководном районе с проходом подводного пловца.

При проведении исследований одновременно излучались непрерывные тональные высокочастотные сигналы на частотах 10; 15 и 20 кГц. Ненаправленный излучатель располагался на расстоянии 25 м от береговой черты водной акватории. Два приемных гидрофона, расположенные на расстоянии 80 м друг от друга, принимали излучённые гидроакустические сигналы. Предполагалось, что на одном гидрофоне производилась запись фонового сигнала без наличия в его районе движущегося объекта. При этом излучённый сигнал, после отражения от поверхности воды, принимался приёмными гидрофонами, после чего детектировался амплитудным детектором. Экспериментальные исследования предполагали фоновую запись с выхода амплитудных детекторов двух приемных преобразователей при отсутствии движущегося подводного пловца в озвученной зоне морского пространства. Затем подводный пловец входил в область одного из гидрофонов, второй в это время давал информацию о помехе. После записи на компьютер ВЧ-сигналов с двух гидрофонов в отдельные файлы производилась их обработка с использованием адаптивного фильтра по схеме, показанной на рис. 3.

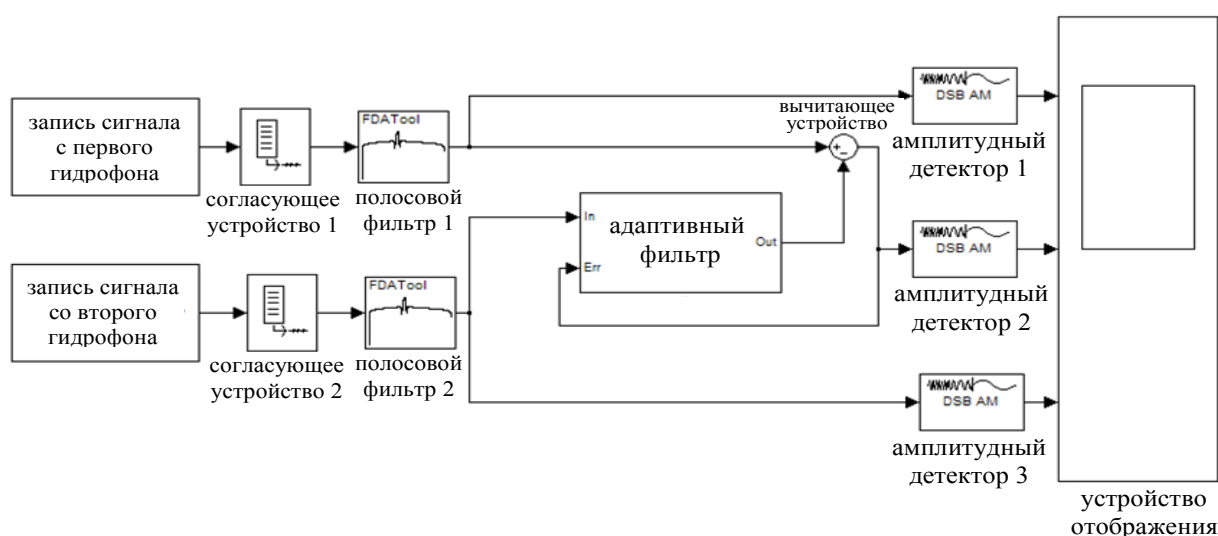
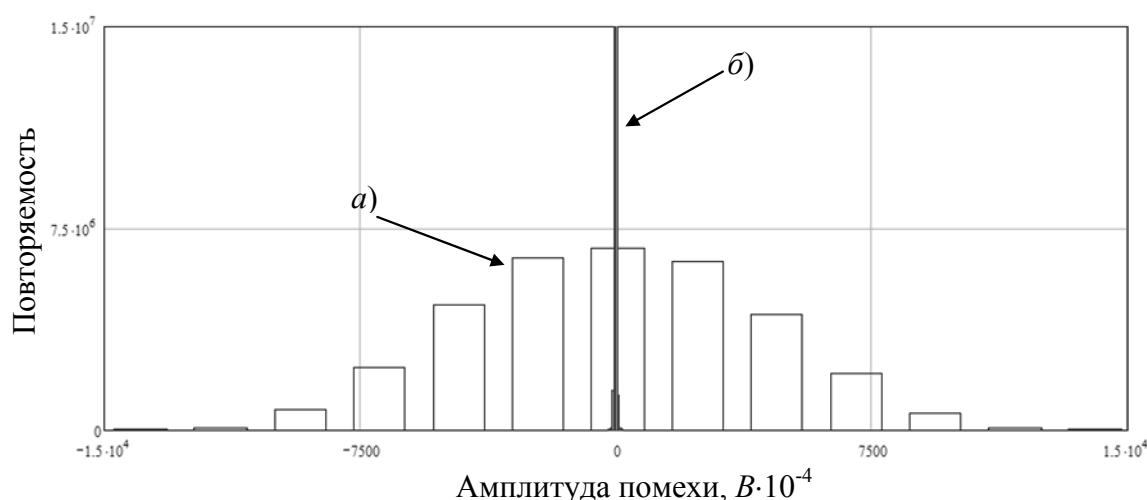


Рис. 3. Схема обработки сигналов, принятых на два гидрофона

Эффективность снижения среднеквадратической ошибки помехи после обработки её адаптивным фильтром продемонстрировано на рис. 4, где представлены гистограммы распределения излученного ВЧ-сигнала, принятого гидрофоном без обработки, и сигнала ошибки на выходе адаптивного фильтра.



**Рис. 4.** Гистограммы распределения ВЧ сигнала с выхода приемного гидрофона:  
 – без обработки сигнала (*a*);  
 – после обработки сигнала на выходе адаптивного фильтра (*б*)

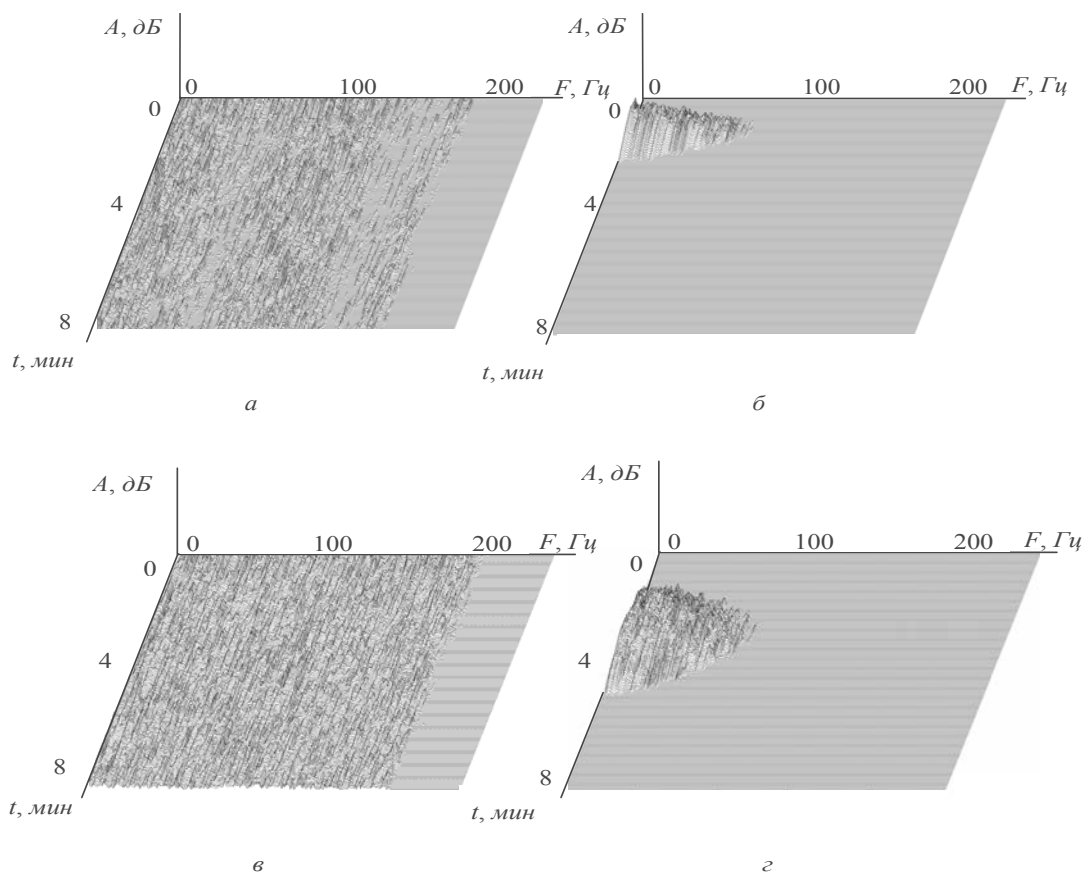
Из анализа рис. 4 видно, что гистограмма распределения сигнала ошибки уже, чем гистограмма распределения опорного ВЧ-сигнала, при этом дисперсия для опорного сигнала составила 0,0163943, а для сигнала ошибки – 0,00000829. Из расчётов видно, что адаптивный фильтр подавляет помеху в опорном сигнале почти в 2000 раз.

Результаты экспериментальных исследований при регистрации прохода подводного пловца представлены на рис. 5.

На рис. 5 видно, что адаптивная обработка позволяет выделить сигнал от прохода 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 ВЧ-сигналов, которые определяются как частотой излучения, так и условиями распространения.

Для исследования зависимости эффективности регистрации прохода пловца на фоне взволнованной поверхности водной акватории в зависимости от частоты ВЧ-излучения были произведены вычисления корреляционных связей между излучёнными сигналами с двух гидрофонов.

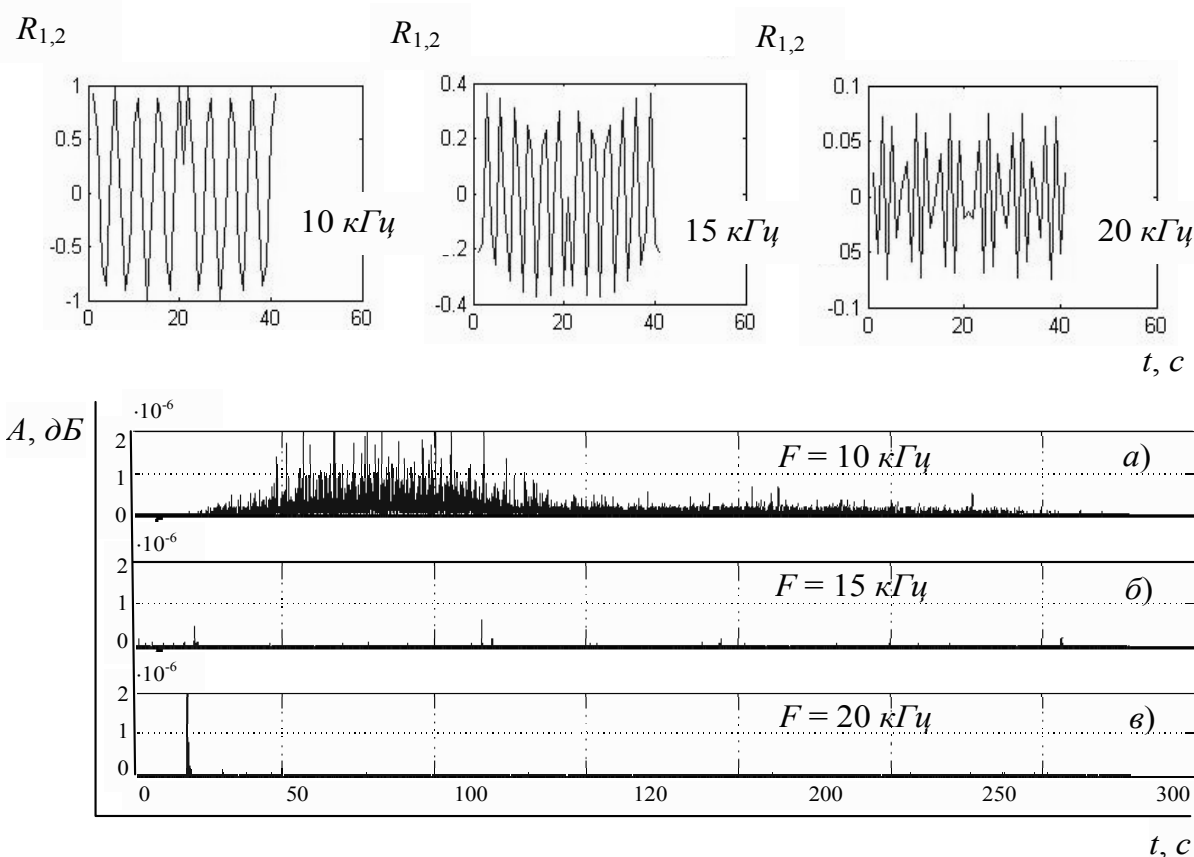


**Рис. 5.** Спектрограммы в 3-D формате сигнала на выходе схемы обработки при обнаружении пловца (частота излучения ВЧ-сигнала – 10 кГц):  
*а, в* – до обработки излучённого сигнала;  
*б* – после обработки излучённого сигнала с выхода первого гидрофона;  
*г* – после обработки излучённого сигнала с выхода второго гидрофона

На рис. 6 представлены результаты измерений коэффициента взаимной корреляции  $R_{1,2}$  сигналов, принятых 1-м и 2-м гидрофонами на различных частотах излучения (10, 15 и 20 кГц) в условиях отсутствия прохода пловца при повышенном уровне волнения в водной акватории. Результаты обработки излучённых сигналов (частотой 10, 15 и 20 кГц) при проходе пловца в условиях повышенного волнения показаны на рис. 6 *а, б, в*. Как видно из рис. 6, при излучении ВЧ-сигнала 10 кГц коэффициент взаимной корреляции  $R_{1,2}$  между сигналами, записанными с двух гидрофонов в условиях отсутствия прохода пловца, близок к единице. На этой частоте происходит выделение сигнала от прохода подводного пловца (рис. 6*а*).

При низком коэффициенте корреляции, который наблюдался на частотах 15 и 20 кГц, сигнал от прохода пловца не был зарегистрирован. Низкий коэффициент корреляции на частотах излучения 15 и 20 кГц может быть объяснён высоким параметром Релея для этих частот, характеризующим соотношение длин волн – излучённой гидроакустической и гидродинамической волны морской поверхности. Если параметр Релея большой, как это наблюдалось при проведении данного эксперимента для частот 15 и 20 кГц, то отражённый гидроакустический сигнал от взволнованной поверхности водной акватории будет характеризоваться в основном рассеянной составляющей (поверхность водной акватории нельзя считать гладкой). Отсутствие когерентной составляющей

в отражённом от поверхности воды сигнале не позволит создать интерференционную картину, а также затруднит подавление некоррелированной помехи адаптивным фильтром. Это, как видно на рис. 6, приводит к неэффективности предложенного метода регистрации прохода движущегося объекта на определённых частотах излучения.

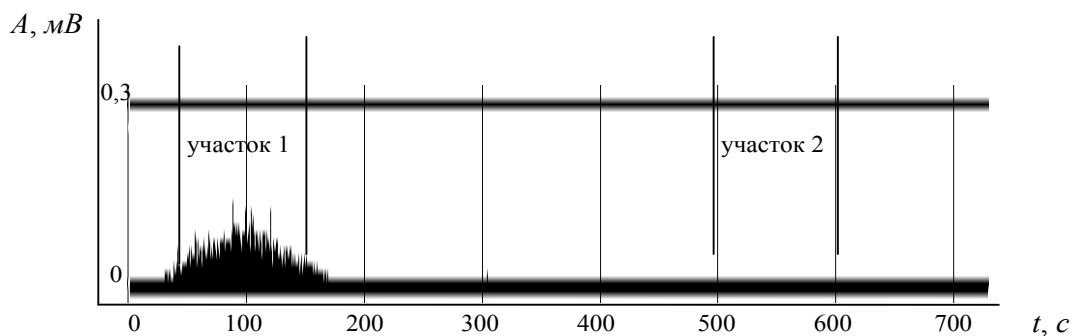


**Рис. 6.** Коэффициенты взаимной корреляции по помехе и амплитудно-временные диаграммы прохода пловца с выхода одного из приемных гидрофонов на частотах излучения 10; 15 и 20  $\text{kHz}$

Гидроакустическое обнаружение сводится к принятию решения о наличии или отсутствии полезного сигнала (цели). Поскольку приём полезного сигнала происходит на фоне помех, затрудняющих принятие решения, задача обнаружения является статистической, а решение принимается с той или иной вероятностью, определяющей качество обнаружения

На рис. 7 представлена реализация, полученная после схемы обработки с 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 и теоретической плотности распределения.

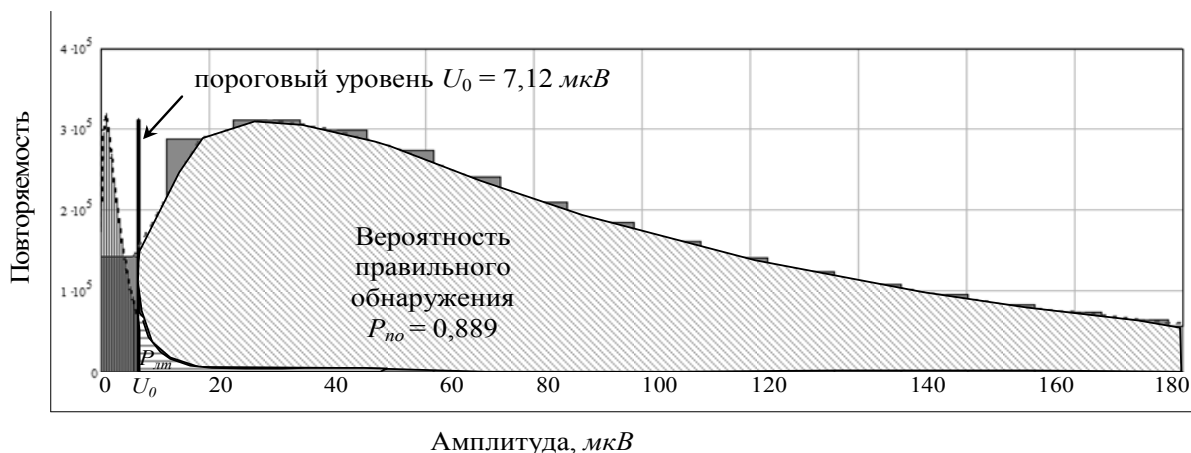


**Рис. 7.** Амплитудно-временная диаграмма сигнала после схемы обработки

Для проверки соответствия плотности распределения, полученной по данным выборок и некоторой теоретической плотности распределения был применён критерий Колмогорова-Смирнова и произведён расчёт в среде MATLAB по разработанному алгоритму.

Результаты показали, что полученные выборки амплитудных флуктуаций сигнала распределены по закону Рэля при заданном уровне значимости с вероятностью 0,95.

На рис. 8 показаны гистограммы распределения выборок амплитудных флуктуаций помехи и смеси сигнала с помехой. Порог обнаружения выбран по критерию Неймана-Пирсона с заданной вероятностью ложной тревоги  $P_{лт} = 10^{-7}$ .



**Рис. 8.** Гистограммы распределения выборок амплитудных флуктуаций помехи и смеси сигнала с помехой с одного из гидрофонов

Из рис. 8 видно, что при проведении эксперимента в морских условиях вероятность правильного обнаружения составила 0,88 (при вероятности ложной тревоги  $10^{-7}$ ), что говорит о высокой эффективности предложенного метода обнаружения пловца в сложных условиях интерференционной структуры акустического поля, возникающего в мелководных прибрежных районах с повышенным уровнем реверберационной помехи.



## **Заключение**

Таким образом, использование адаптивной фильтрации при создании охранной системы водного района интерференционного типа позволяет компенсировать фоновые помехи, связанные с модуляцией излученного гидроакустического сигнала при отражении от взволнованной поверхности водной акватории, и зарегистрировать проход подводного пловца в контролируемой зоне. При этом выбор частоты излучения следует предварять измерением параметра Релея, характеризующего степень когерентности сигнала, отражённого от морской поверхности.

## **Литература**

1. *Способ* обнаружения объектов в контролируемой зоне / Трефилов Н.А. и др. // Патент РФ на изобретение № 2130646 от 20.05.1999.
2. *Устройство* обнаружения и пеленгования движущегося морского объекта / Калашников И.И., Колмогоров В.С., Сенченко А.Г., Юрченко Е.Н. // Патент на полезную модель № 72550 от 20.04.2008.
3. *Колмогоров В.С., Калашников И.И., Сенченко А.Г.* Использование адаптивного фильтра в охранной системе интерференционного типа при обнаружении движущегося подводного объекта // *Специальная техника*. № 1. 2008. С. 14-17.
4. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. С.-Пб.: Питер, 2006. 752 с.
5. *Авилов К.В.* Программный комплекс РПЗЭМС, Научно-технический центр "Модуль" // Сб. программ "Программные средства расчёта характеристик канала распространения звука в морской среде". М.: РТУ ВМФ, 2003.
6. *Адаптивная* фильтрация сигнала при мониторинге морской среды / Колмогоров В.С. и др. // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. № 4. 2009. С. 20-25.