

УДК 621.396.933.21

© А. В. Рогожников
ОАО «ЦНИИ «Курс», Москва
rav@kyrs.ru

ОБНАРУЖЕНИЕ ТРАНЗИЕНТНЫХ БИОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНОЙ СРЕДЕ

Работа посвящена методу обнаружения биоакустических сигналов, основанному на выборочном оценивании высших статистических моментов звуковых полей, регистрируемых фазированной антенной решеткой. Для апробации предлагаемого метода разработан и изготовлен макет подводного гидроакустического устройства с кольцевой фазированной антенной решеткой. Обсуждаются результаты испытаний устройства в натурных условиях с использованием цифрового имитатора сигналов гидробионтов. Показано, что использование теста Jarque-Bera в качестве решающей статистики позволяет обнаруживать транзистные сигналы с большей вероятностью по сравнению с классическими шумопеленгаторами.

Ключевые слова: гидробионты, транзистные биоакустические сигналы, алгоритм обнаружения, тест Jarque-Bera (Харке-Бера), рабочие характеристики.

A. V. Rogozhnikov
JSC «CSRI «Kurs», Moscow, Russia
rav@kyrs.ru

DETECTION OF UNDERWATER BIOACOUSTIC TRANSIENTS

This paper describes a method for detection of marine bioacoustic signals. The method is based on higher-order statistics technique to identify transients in passive array data. A prototype underwater unit with integrated phased circular array has been engineered to test the approach. Results of in-situ measurements obtained using artificial targets are presented. Specifically, implementation of Jarque-Bera test is shown to have resulted in a substantial increase in detection efficiency as against that achieved by traditional signal processing techniques.

Key words: hydrobionts, transient bio-acoustic signals, signal detection, Jarque-Bera test, operating characteristics.

Акустические методы в настоящее время широко используются для изучения морских биоресурсов. Известно, однако, что в отличие от шумов естественного и техногенного происхождения, биоакустические сигналы зачастую представляют собой транзистные сигналы [1, 2] с распределением вероятностей, существенно отличающимся от нормального. В этих условиях использование классических методов обнаружения может не в полной мере отвечать решению поставленной задачи, поскольку соответствующие алгоритмы обработки [3, 4], оптимизированные для стационарных гауссовских моделей, могут значительно уступать в эффективности алгоритмам, учитывающим реальное статистическое распределение обнаруживаемых транзистных сигналов.

Статья посвящена результатам выполнения работы в рамках проекта по разработке буксируемого гидролокатора для обнаружения биоакустических сигналов [5]. Цель работы заключалась в создании алгоритмического обеспечения, реализующего тест *Jarque-Bera* [6] в качестве решающей статистики гидролокатора. В статье обсуждаются результаты натурных (морских) испытаний макета подводного модуля гидролокатора, проведенные с использованием специально разработанного для этих целей цифрового устройства, имитирующего биоакустические сигналы гидробионтов. Цель испытаний состояла в экспериментальном сравнении характеристик гидролокатора, использующего тест *Jarque-Bera*, с обычным энергетическим приемником.

Общий вид подводного модуля с интегрированной в корпус многоэлементной антенной решеткой и бортовым компьютером показан на рис. 1; наружная поверхность антенной решетки

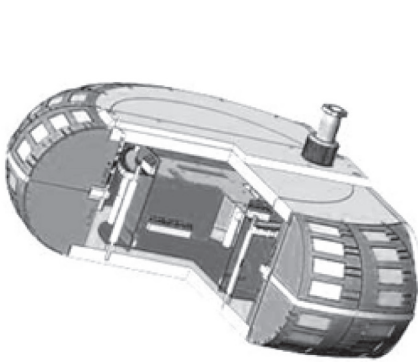


Рис. 1. Общий вид подводного модуля с вырезом ¼.

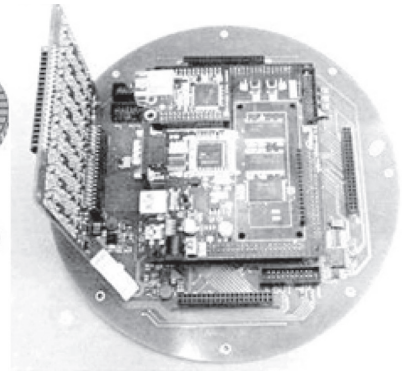
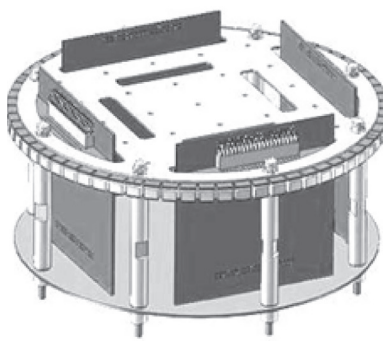


Рис. 2. Электронная модель и фотография компонент модуля обработки сигналов.

образована модулями изоляторов, в нишах которых расположены приемные элементы из широкополосной композитной пьезокерамики. Сигналы, снимаемые с приемных элементов, вводятся во внутреннее пространство контейнера и подаются на входы усилителей блока предварительной обработки сигналов. Несущими элементами приборного отсека являются верхняя, нижняя и медальная металлические панели.

Герметичность внутреннего объема обеспечивается элементами антенной решетки, приклеиваемыми снаружи на несущие панели. Верхняя панель снабжена люком для доступа к внутреннему объему модуля, в котором расположен блок цифровой обработки сигналов. Блок цифровой обработки выполнен в виде материнской платы из стеклотекстолита диаметром 210 мм. На плате смонтированы разъемы для подключения плат предварительного усилителя и АЦП. На ней же смонтирован блок предварительной цифровой обработки на базе ПЛИС EP3C40Q240C8N и установлены дополнительные разъемы для подключения бортовой ЭВМ. На рис. 2 представлены фотографии общего вида (модели) и компонент электронного блока.

Рабочий частотный диапазон входных аналоговых цепей и АЦП составлял 0,8–30 кГц. Неконтролируемый технологический разброс параметров чувствительных элементов антенной решетки компенсировался введением корректирующих коэффициентов, значения которых определялись по критерию СКО:

$$P = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (k_i Y_{ij} - Z_{ij} v_j)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\{v_m\}$ — интенсивность падающей волны для m -го углового положения антенной решетки; $\{Z_{nm}, n = 1:N; m = 1:M\}$ — опорный набор парциальных диаграмм направленности элементов решетки; $\{Y_{nm}, n = 1:N; m = 1:M\}$ — матрица фактически измеряемых интенсивностей сигнала на элементе n при m -ом угловом положении антенной решетки.

Данный метод корректировки весовых коэффициентов был реализован на прототипе антенной решетки, установленной на поворотном стенде с многоканальным детектором огибающей и интерфейсом для ввода данных в ЭВМ. Приемные элементы располагались в пределах сектора в 270 градусов, что позволило сформировать 24 пространственных измерительных канала с диаграммами направленности, равномерно заполняющими сектор обзора. На стенде измерялись чувствительность и диаграмма направленности каждого из элементов фазированной решетки для заданного набора угловых положений антенны. Полученные данные затем использовались для расчета корректирующих коэффициентов по алгоритму (1). Как показали результаты измерений, относительный разброс чувствительности приемных элементов $\{\tilde{k}_n\}$ составлял около 25 %, а уровень боковых лепестков диаграммы направленной при этом достигал –11 дБ. Корректировка коэффициентов с использованием описанной методики позволила снизить уровень боковых лепестков антенной решетки до –18 дБ. Результаты корректировки представлены на рис. 3, иллюстрирующем максимальный уровень боковых лепестков для различных парциальных каналов до и после корректировки.

Помимо 16-канальной конформной антенной системы, (8 каналов из 24 было зарезервировано для специального использования), в состав подводного модуля гидролокатора входят:

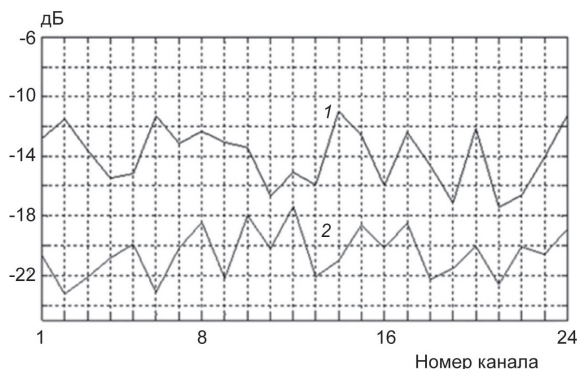


Рис. 3. Максимальный уровень боковых лепестков до (1) и после (2) корректировки чувствительности элементов решетки.

Здесь же осуществляется кондиционирование сигналов, заключающееся в регулировке усиления с глубиной 48 дБ. Кондиционированный сигнал с амплитудой по напряжению в интервале ± 1.8 В подается на вход многоканального АЦП, где он преобразуется в 16-битный код и подается на вход модуля цифровой обработки. Модуль цифровой обработки выполняет следующие основные функции: управляет общим циклом работы устройства, реализует SPI интерфейс для обслуживания АЦП, осуществляет многоканальную цифровую фильтрацию и буферизацию сигнала для его последующей передачи в управляющую бортовую микро-ЭВМ. В состав микро-ЭВМ входит модуль пакетирования и передачи данных по протоколу TCP/IP; передача данных от бортового модуля цифровой обработки в удаленный компьютер осуществляется по кабельной линии UTP-5 с пропускной способностью 10 Мбит/с. Программное обеспечение, установленное на персональном компьютере, осуществляет обработку, архивацию и визуализацию данных.

При проведении морских испытаний макета гидролокатора, излучаемые имитатором акустические сигналы регистрировались антенной решеткой подводного модуля в присутствии естественных шумов моря, подвергались предварительной обработке во встроенном процессорном блоке и затем передавались в расположенный на берегу компьютер, программное обеспечение которого позволяло выполнять обработку данных с использованием: 1) решающей статистики энергетического приемника и 2) статистики, реализующей тест *Jarque-Bera* [6]:

$$J_B \propto \left(\frac{\hat{M}_3}{(\hat{M}_2)^{3/2}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\hat{M}_4}{(\hat{M}_2)^2} - 3 \right)^2, \quad (2)$$

где $\hat{M}_{2,3,4}$ — выборочные оценки соответствующих центральных моментов сигнала на выходе фазированной антенной решетки. Сравнение характеристик обоих алгоритмов обработки производилось на одних и тех же массивах экспериментальных данных. Полезный (подлежащий обнаружению) сигнал в измерениях создавался имитатором, излучавшим в воду цифровые копии реальных биоакустических транзиентов с $J_B = 12$.

На рис. 4 приведены результаты экспериментальной оценки рабочих характеристик энергетического приемника (рис. 4, а) и тестируемого алгоритма обработки, использующего в качестве решающей статистики тест (2) (рис. 4, б).

Абсциссы на графиках на рис. 4 отвечают значениям отношения сигнал/помеха (ОСП) на выходе блока предварительной обработки сигнала в процессоре подводного модуля (т. е., фактически, на выходе фазированной приемной решетки); ОСП вычислялось как отношение энергии полезного сигнала к среднему значению спектральной плотности помехи в полосе 0.8–30 кГц.

Полученные результаты показывают, что в условиях проведенных натурных испытаний, использование теста *Jarque-Bera* в качестве решающей статистики алгоритма обработки обеспечивало увеличение чувствительности гидролокатора примерно на 3 дБ по мощности полезного сигнала

– система предварительного усиления, фильтрации и кондиционирования сигнала на 16 каналов;

– 16-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) разрядностью 16 бит с максимальной частотой дискретизации 450 кГц;

– система обслуживания АЦП и цифровых фильтров;

– управляющая бортовая микро-ЭВМ с системой приема, пакетирования и передачи цифровых данных на удаленный персональный компьютер.

Принцип работы гидролокатора состоит в следующем. Принятые антенной решеткой акустические сигналы усиливаются и фильтруются многоканальным предварительным усилителем.

по сравнению с тестом отношения правдоподобия (энергетическим приемником).

Наблюдаемое увеличение вероятности обнаружения транзитных биоакустических сигналов в окружающем шуме объясняется необыкновенно высокой чувствительностью теста *Jarque-Bera* к отличиям статистики обрабатываемого сигнала от нормального закона.

Количественно, выигрыш в вероятности обнаружения, обеспечиваемый использованием теста *Jarque-Bera* в конкретной сигнально-помеховой обстановке, определяется несколькими факторами, в том числе: 1) степенью близости распределения окружающего шума к нормальному закону; 2) степенью различия статистических характеристик полезного сигнала и помехи и, наконец, 3) соотношением мощностей полезного сигнала и помехи на выходе тракта предварительной обработки сигнала. Последнее обстоятельство объясняется тем, что при увеличении уровня помех, присутствие полезного сигнала в аддитивной смеси с окружающим шумом будет приводить ко все менее заметному отличию распределения наблюдаемых реализаций процесса от распределения помехи, и эффективность применения теста *Jarque-Bera* будет, вообще говоря, снижаться. Решение вопроса о целесообразности применения теста *Jarque-Bera* для решения практических задач по обнаружению биоакустических транзитных сигналов должно опираться на результаты анализа фактической сигнально-помеховой обстановки в районах планируемого использования гидролокатора.

Литература

1. *Gervaise C.* et al. Automatic detection of bioacoustics impulses based on kurtosis under weak signal to noise ratio // *Applied Acoustics*. 2010. V. 71. P. 1020–1026.
2. *Sylvain Busson* et al. Higher-order statistics for bioacoustic click detection // Lyon, 12–16 Avril 2010 : s.n. 10-eme Congres Francais d'Acoustique.
3. *Helstrom C. W.* Statistical Theory of Signal Detection. Oxford: Pergamon press, 1968.
4. *Monzingo R. A., Miller T. W.* Introduction to Adaptive Arrays. New York: John Wiley & Sons, 1980.
5. Буксируемая пассивная гидролокационная система для обнаружения и пеленгования гидробионтов: пат. 138624 Российская Федерация: МПК G01S 15/96 (2006.01) / А. В. Рогожников, С. Е. Новиков, А. В. Добровольский; заявитель и патентообладатель ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Курс». № 2013143656/28; заявл. 27.09.13; опубл. 20.03.14, Бюл. № 8.
6. *Jarque C. M., Bera A. K.* A test for normality of observations and regression residuals // *International Statistical Review*. 1987. V. 55, N 2. P. 163–172.

Статья поступила в редакцию 06.06.2014 г.

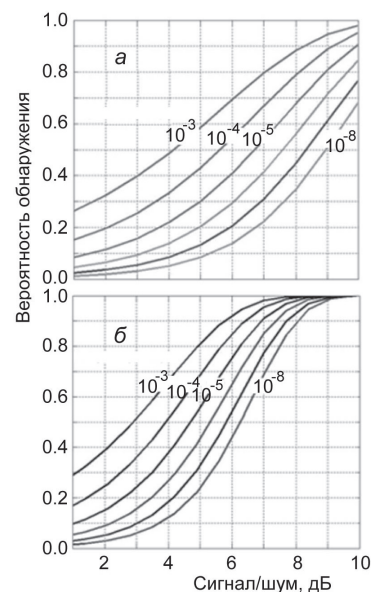


Рис. 4. Рабочие характеристики приемника, реализующего тест отношения правдоподобия, (а) и детектора сигналов, реализующего тест *Jarque-Bera* (б). Цифры на кривых обозначают уровень ложной тревоги.