

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕЛЬФИНОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ

Пестерев И.С. Email: Pesterev652@scientifictext.ru

*Пестерев Иван Сергеевич - аспирант,  
кафедра электроакустики и ультразвуковой техники,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург*

**Аннотация:** в статье рассматривается способ формирования широкополосных биоподобных сигналов с помощью гидроакустических преобразователей волноводного типа при их электрическом возбуждении в соответствии с решением задачи синтеза. Описана лабораторная установка для автоматизированного проведения гидроакустических измерений. Представлены результаты эксперимента по формированию дельфиноподобных сигналов, дана количественная оценка степени соответствия реального сигнала дельфина и имитирующего его синтезированного сигнала.

**Ключевые слова:** сигналы дельфинов, биоподобные сигналы, задача синтеза.

## THE APPLICATION OF THE HYDROACOUSTIC SYSTEM BASED ON THE TRANSDUCER OF WAVEGUIDE TYPE TO DOLPHIN-LIKE SIGNALS FORMATION Pesterev I.S.

*Pesterev Ivan Sergeevich – Postgraduate Student,  
DEPARTMENT OF ELECTROACOUSTICS AND ULTRASONIC TECHNICS,  
SAINT-PETERSBURG ELECTROTECHNICAL UNIVERSITY SAINT-PETERSBURG ULYANOV (LENIN),  
SAINT-PETERSBURG*

**Abstract:** the article discusses the method of forming broadband biomimetic signals using hydroacoustic transducers of waveguide type with their electrical excitation in accordance with the solution of the synthesis problem. A laboratory setup for automated hydroacoustic measurements is described. The results of the experiment on dolphin-like signals formation are presented, a quantitative assessment of the degree to which the real dolphin signal and a simulated synthesized signal match is made.

**Keywords:** dolphin signals, biomimetic signals, synthesis problem.

УДК 534.232, 681.883.

Современный этап развития гидроакустических средств, в частности, активных гидроакустических станций, систем звукоподводной связи и опознавания, средств гидроакустического противодействия характеризуется, в первую очередь, необходимостью повышения их разрешающей способности и эффективности работы в сложных помеховых условиях. Это во многом связано с интенсивным развитием направления необитаемых подводных аппаратов, способных работать в районах, опасных или недоступных для надводных кораблей и подводных лодок. Повышение эффективности активных гидроакустических средств может быть достигнуто за счет внедрения новых принципов формирования акустических сигналов, среди которых один из наиболее перспективных – использование дельфиноподобных сигналов.

В настоящее время за рубежом активно ведутся разработки биоподобных гидроакустических систем на основе биосонара дельфина. Результаты многочисленных исследований демонстрируют наличие у дельфинов эффективного механизма обнаружения и распознавания подводных объектов, а также коммуникации между особями в различной помеховой обстановке, в основе которого лежит формирование коротких широкополосных акустических сигналов сложной формы. Спектры таких сигналов локализованы в диапазоне частот от 30 до 150 кГц и не имеют ярко выраженного максимума. Как показывает практика, в основном зарубежная [1 – 4], для формирования подобных сигналов необходимо использование широкополосных гидроакустических преобразователей с полосой пропускания не менее двух октав вместе со специализированной системой возбуждения. Одним из возможных решений в этом направлении является разработка и исследование широкополосной гидроакустической системы, построенной на базе преобразователя волноводного типа (ПВТ), принцип действия которого описан в работе [5]. Схема построения и возбуждения ПВТ показана на рис. 1.

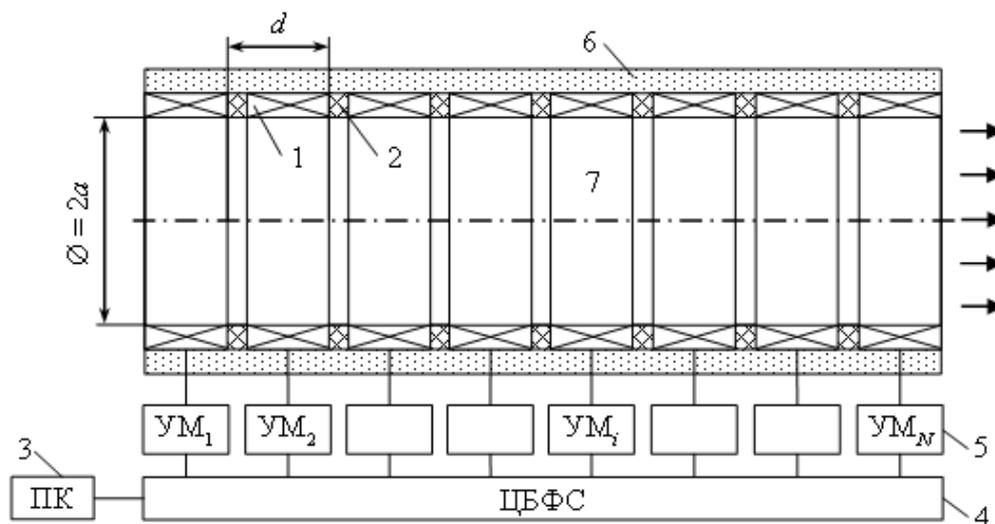


Рис. 1. Схема построения и возбуждения одиночного ПВТ

ПВТ представляет собой соосный набор идентичных водозаполненных пьезоцилиндров 1, разделенных по торцам акустически гибкими прокладками 2, внешняя цилиндрическая поверхность 6 которых экранирована, а во внутренней водозаполненной полости 7 формируется бегущая волна. Способ возбуждения ПВТ основан на решении для него задачи синтеза [5], когда по заданному амплитудно-фазовому распределению колебательной скорости на его внутренней поверхности определяются частотные зависимости возбуждающих пьезоцилиндров электрических напряжений.

В работе [6] показан вариант технической реализации системы возбуждения макетов антенн, образованных параллельным набором ПВТ (см. рис. 2, а), которая работает следующим образом. Импульсы возбуждения формируются в результате решения задачи синтеза с использованием прямого и обратного преобразований Фурье на основе расчетной модели ПВТ с помощью персонального компьютера (ПК) 3 (см. рис. 1) в виде массивов временных отсчетов, которые записываются в память цифрового блока формирования сигналов (ЦБФС) 4. ЦБФС, по сути, представляет собой многоканальный цифроаналоговый преобразователь, который после записи сигналов в память работает независимо от ПК. Аналоговые сигналы напряжения от ЦБФС подаются на усилители мощности (УМ) 5, а с выходов усилителей – на соответствующие пьезоцилиндры ПВТ.

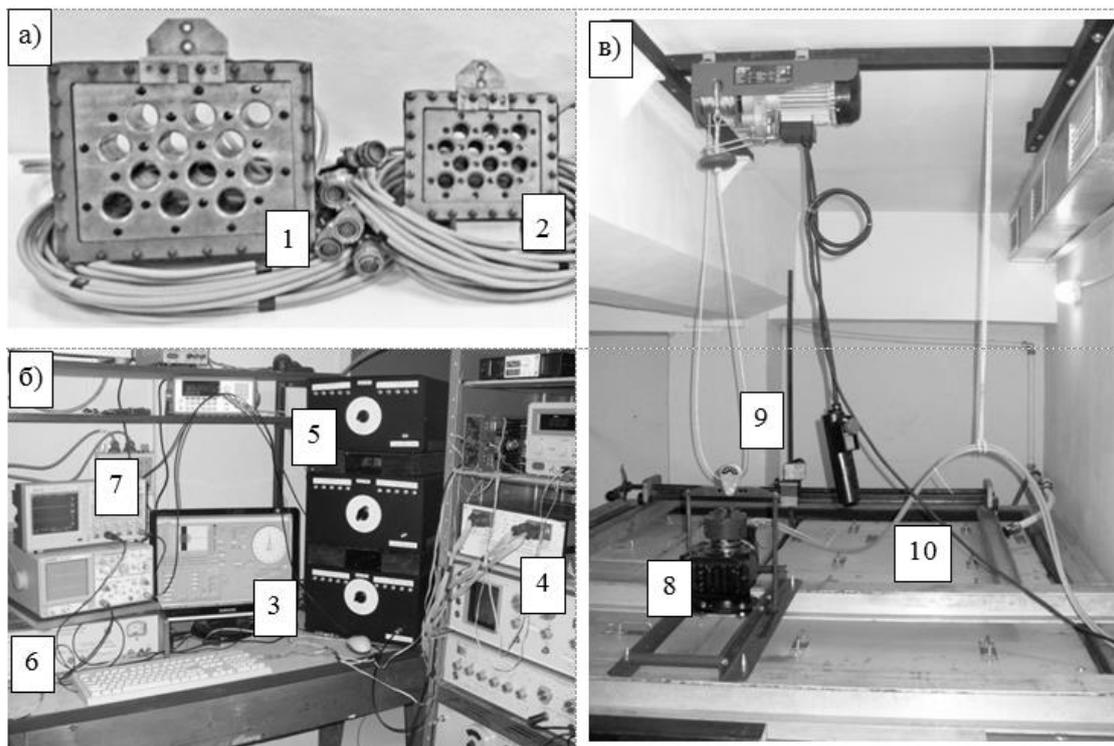


Рис. 2. Макеты антенн, составленных из ПВТ (а), рабочее место оператора контрольно-измерительного стенда (б), заглушенный гидроакустический бассейн (в)

Измерения исследуемых макетов антенн проводились с использованием контрольно-измерительного стенда [7] на базе заглушенного гидроакустического бассейна кафедры ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», показанного на рис. 2, б, в. На рис. 2 отмечены: 1 и 2 – макеты №1 и №2 антенн, составленные каждый из 12 ПВТ (частота радиального резонанса пьезоцилиндров  $f_p$  соответственно 30 и 44 кГц); 3 – управляющий ПК с виртуальным прибором LabVIEW, позволяющим автоматизировать измерительные процессы; 4 – ЦБФС; 5 – многоканальный блок УМ; 6 – измерительный усилитель; 7 – цифровой осциллограф с функцией поточечной записи данных на флэш-накопитель; 8 – программно управляемое поворотное устройство; 9 – крепление измерительного гидрофона; 10 – съемное заглушающее покрытие гидроакустического бассейна.

Макеты № 1 и № 2 при возбуждении ПВТ в соответствии с решением задачи синтеза имеют полосу пропускания в режиме излучения по уровню -3 дБ выше трех октав, а также обладают ярко выраженной однонаправленностью излучения [5]. Кроме того, способ возбуждения ПВТ по принципу формирования бегущей волны в его внутренней водозаполненной полости обеспечивает близкую к линейной фазочастотную характеристику излучения, что позволяет формировать короткие акустические сигналы без существенных искажений.

Указанное обстоятельство может быть подтверждено в рамках эксперимента по формированию дельфиноподобных акустических сигналов. В качестве примера на рис. 3, а показаны реальные нормированные сигналы дельфина, а на рис. 3, б – синтезированные акустические сигналы, сформированные с помощью макетов № 1 и № 2. Средняя частота рабочего диапазона частот макетов в 2...3 раза ниже средней частоты спектра реальных сигналов дельфина, поэтому спектры этих сигналов были отмасштабированы по частоте так, чтобы их основная область частот соответствовала полосе пропускания макетов. Приведенные результаты демонстрируют хорошее визуальное соответствие синтезированных сигналов реальным, восстановленным после пересчета спектра. Здесь и далее графики построены в относительных единицах по оси ординат.

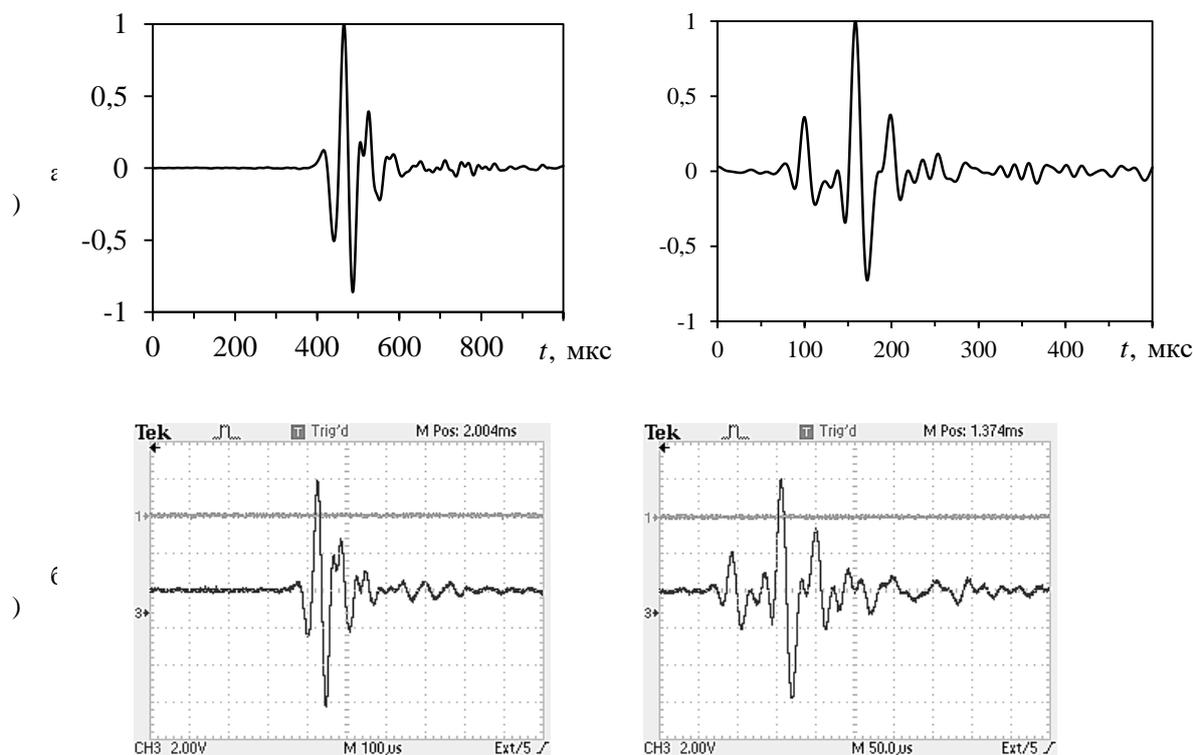


Рис. 3. Реальные (восстановленные) сигналы дельфинов (а) и синтезированные сигналы, излученные макетами №1 и №2 (б) и зафиксированные с помощью осциллографа

При обработке результатов данного эксперимента возникает важная практическая задача, заключающаяся в получении количественной оценки степени соответствия реального сигнала дельфина и имитирующего его синтезированного сигнала, например, с использованием методов корреляционного анализа [8]. В рамках настоящей работы такая оценка выполнена для восстановленного эхолокационного сигнала дельфина, показанного на рис. 4, а («реальный»), в сравнении с имитирующим его сигналом

(«синтезированный»), сформированным с помощью макета №1 и поточно записанным с использованием цифрового запоминающего осциллографа.

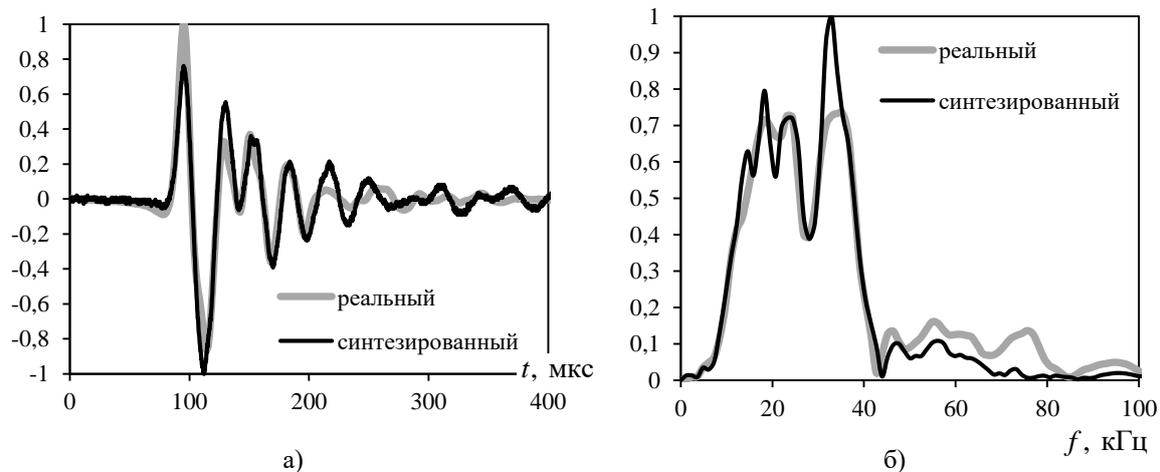


Рис. 4. Реальный (восстановленный) акустический сигнал дельфина и синтезированный сигнал, излученный макетом №1 (а), а также их амплитудные спектры (б)

Для практического применения (например, для построения согласованного фильтра или исследования искажений спектра эхосигнала) наибольший интерес представляет работа со спектральными характеристиками сигналов. На рис. 4, б показаны амплитудные спектры реального и синтезированного рассматриваемых сигналов, а на рис. 5 – их корреляционное поле. Как видно, корреляционная связь носит выраженный линейный характер и может быть описана линейной функцией регрессии с величиной достоверности  $R^2 = 0,9643$ , которая представляет собой коэффициент детерминации [8].

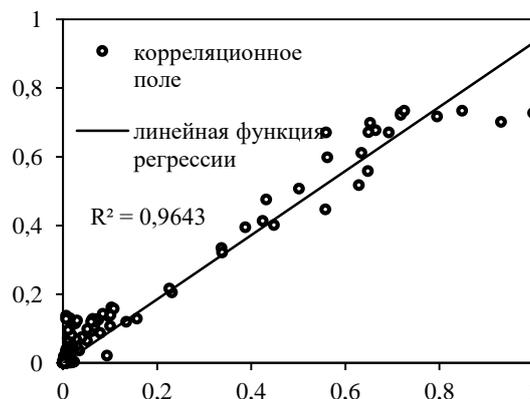


Рис. 5. Корреляционное поле спектров реального и синтезированного сигналов

Для оценки силы линейной связи используется выборочный коэффициент линейной корреляции Пирсона  $r$ , который представляет собой отношение выборочного коэффициента ковариации

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

к произведению выборочных средних квадратических отклонений  $s_x, s_y$ :

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где  $x_i, y_i$  – значения переменных,  $n = 83$  – объем выборки.

В рассматриваемом случае коэффициент линейной корреляции Пирсона с учетом корректировки при малом объеме выборки  $n < 100$  [9]

$$r' = r \cdot \left[ 1 + \frac{1 - r^2}{2(n - 3)} \right] = 0,9822 \geq 0,95,$$

что означает очень сильную, практически функциональную связь спектров реального и синтезированного сигналов дельфина.

Таким образом, в рамках эксперимента по формированию дельфиноподобных акустических сигналов с использованием макетов антенн, составленных из ПВТ, при их возбуждении в соответствии с решением задачи синтеза получена высокая оценка степени соответствия реального сигнала дельфина и имитирующего его синтезированного сигнала. Это подтверждает эффективность использования гидроакустической системы на базе ПВТ для формирования сложных дельфиноподобных сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

#### *Список литературы / References*

1. *Leighton T.G., White P.R., Finfer D.C.* Sonar which penetrates bubble clouds // Proceedings of the 2nd International Conference & Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results" 25th June to 29th June 2007.
2. *Pailhas Y., Capus C., Brown K.E.* BioSonar: a bio-mimetic approach to sonar systems, concepts and applications // On Biomimetic, IntechOpen, 2011. P. 469–488.
3. *Mishima Y., Uchida K., Amakasu K., Miyamoto Y., Sasakura T.* Development of dolphin-speaker // The Journal of the Marine Acoustics Society of Japan, 2013. Vol. 40. № 1. P. 27–36.
4. *Qiao G., Zhao Y., Liu S., Bilal M.* Dolphin sounds-inspired covert underwater acoustic communication and micro-modem // Sensors, 2017. Vol. 17, 2447.
5. *Степанов Б.Г.* Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. № 3. С. 87–96.
6. *Пестерев И.С.* Система формирования импульсных сигналов для возбуждения сверхширокополосных гидроакустических преобразователей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. № 8. С. 55–63.
7. *Пестерев И.С., Степанов Б.Г.* О расширении функциональных возможностей контрольно-измерительного стенда кафедры ЭУТ для автоматизации измерений частотных и направленных характеристик антенн // 69-я науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 26 января – 4 февраля 2016 г. Сб. докл. студентов, аспирантов и молодых ученых СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. С. 215–220.
8. *Крамер Г.* Математические методы статистики. Пер. с англ. 2 изд. М.: Мир, 1975. 648 с.
9. *Харченко М.А.* Корреляционный анализ // Учебное пособие для вузов, изд.-полиграф. центр Воронежского государственного университета, 2008. 31 с.