



УДК 534.232; 599.53; 612.821

Б. Г. Степанов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Бионические акустические системы и устройства

*Кратко рассмотрена биосенсорная эхолокационная система китообразных. Приведены общие схемы построения и возбуждения макетов сверхширокополосных антенн, составленных из стержневых двухсекционных преобразователей с фазированным возбуждением, а также преобразователей волноводного типа с использованием управляющего компьютера. Показана возможность получения полосы пропускания порядка 2–3 октав и излучения этими макетами эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфинов и белух, а также перестраиваемых по частоте ультракоротких акустических импульсов в указанной полосе частот.*

### Эхолокационная система китообразных, преобразователь волноводного типа, стержневой преобразователь с фазированным возбуждением, короткий акустический сигнал

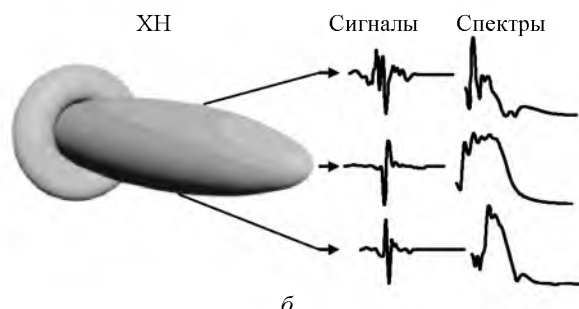
Возможность формирования и управления сложными акустическими сигналами в настоящее время становится все более актуальной. Это связано, прежде всего, с необходимостью разработки методов и технических путей, позволяющих существенно повысить эффективность проектируемых гидроакустических систем (ГАС), например, путем улучшения таких их характеристик, как точность пеленгования и распознавание подводных объектов, скрытность работы и ее помехозащищенность. В определенной мере этим условиям отвечает биосенсорная эхолокационная система китообразных.

Исследования поведения морских животных (дельфинов, зубатых и усатых китов и др.) и излучаемых ими акустических сигналов, выполненные отечественными и зарубежными учеными, показывают, что в зависимости от характера решаемых этими животными задач (обнаружения, коммуникации, ориентации и др.) существенно

изменяется пространственно-временная и спектральная структура излучаемых ими импульсных акустических сигналов [1], [2]. В качестве примера на рис. 1 показаны схемы формирования пространственно-временных эхолокационных сигналов дельфина (рис. 1, а) и их спектрально-временных параметров в пределах основного конуса характеристики направленности (ХН) (рис. 1, б). При этом отмечается практически безотказная способность китообразных по обнаружению различных объектов в сложных помеховых условиях (реверберация на мелководье, эхолокационные сигналы сородичей при охоте на косяки рыб и др.). Это свидетельствует об уникальности эхолокационной системы китообразных, которая совершенствовалась в процессе многовековой эволюции. Так, например, излучающая система дельфина (рис. 2) состоит из набора трех пар пневмопушек (воздушных полостей 1, управляе-



а



б

Рис. 1

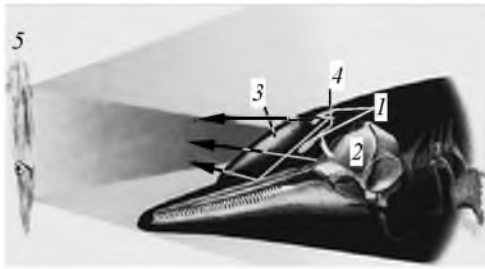


Рис. 2

мых охватывающими их мышцами), рефлектора 2, состоящего из лобных костей с переменной отражающей способностью, и рефрактора 3 (акустической линзы), образованного жировым слоем (меломом) с плавно изменяющимся от центра к периферии акустическим сопротивлением. На рис. 2 также показаны дыхательный клапан 4 и объект эхолокации 5. Приемная система дельфина образована набором нервных окончаний, расположенных вдоль его нижней челюсти, и внутренним ухом. Способность китообразных к изменению формы мелона позволяет управлять направлением и формой основного конуса характеристики направленности при излучении сигналов [2]. На рис. 3 показана возможность изменения формы мелона у белухи: *а* – "полусферическая"; *б* – "плоская" форма.

Выполненные спектральные исследования акустических сигналов китообразных показывают, что для их реализации требуется диапазон частот от 2 до 4 октав, средняя частота которого для разных видов китообразных находится в достаточно широких пределах от 10...20 кГц (кашалоты, усатые киты) до 90...120 кГц (дельфины, белухи). Если в режиме приема, при работе пьезоэлементов, как правило, вне резонанса, эти цифры вполне достижимы, то в режиме излучения реализация указанной полосы пропускания при эффективной работе преобразователей (антенн) является достаточно сложной и не полностью проработанной научно-технической задачей.

Для ее комплексного решения необходима разработка эффективных сверхширокополосных (с относительной полосой пропускания  $\Delta f/f > 100\%$ ) преобразователей (антенн) и технических средств их возбуждения, обеспечивающих в требуемом диапазоне частот формирование близкой к равномерной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) излучения и, что самое важное, линейной фазочастотной характеристики (ФЧХ) излучения преобразователей, входящих в состав гидроакустической антенны. Большинство известных решений (как правило, соответствующих решению

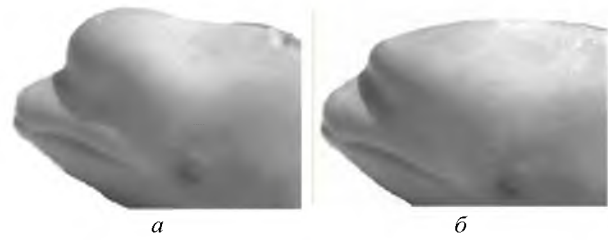


Рис. 3

задачи анализа – определению полевых характеристик преобразователей или антенн по заданному характеру возбуждения), направленных на получение широкополосных и сверхширокополосных АЧХ излучения, для которых часто используются многомодовые или разночастотные преобразователи, несмотря на получаемую в ряде случаев сравнительно малую неравномерность АЧХ, не обеспечивают линейности ФЧХ излучения и, следовательно, возможности формирования сложных или коротких акустических импульсов. Линейность ФЧХ излучения может быть достигнута при возбуждении преобразователей с электрически управляемыми характеристиками в соответствии с решением задачи синтеза – определении необходимых условий возбуждения по заданным АЧХ и ФЧХ излучения. Указанное возбуждение далее в статье называется фазированным возбуждением.

На кафедре электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) уже более сорока лет успешно проводятся исследования и разрабатываются гидроакустические преобразователи и системы с заданными частотными и направленными свойствами, в том числе широкополосные и сверхширокополосные преобразователи, способные излучать сложные и короткоимпульсные акустические сигналы. Исследования последних лет показали принципиальную возможность достижения полосы пропускания, равной 2–3.5 октавам, с помощью стержневых секционированных преобразователей с фазированным возбуждением (ПФВ) [3]–[5], а также преобразователей волноводного типа (ПВТ), образованных соосным набором водозаполненных пьезоцилиндров, возбуждаемых по принципу антенны бегущей волны [6]–[13]. Наиболее интересные результаты для указанных типов преобразователей получаются при возбуждении их в соответствии с решением задачи синтеза, которое для каждого из этих типов преобразователей выполняется с учетом индивидуальности их колебательной системы и

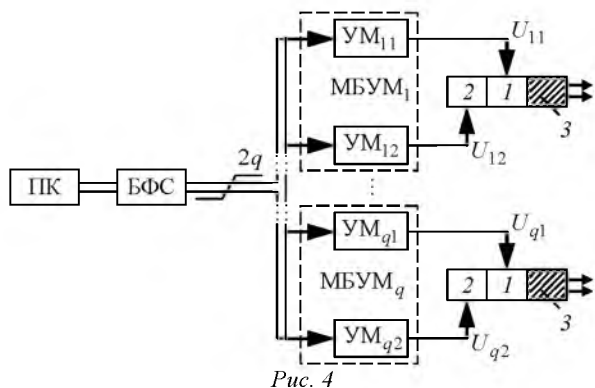


Рис. 4

принципа формирования излучения. При этом задается линейная ФЧХ излучения. Компоновка этих преобразователей в антенну благодаря возможности электрического управления характером колебания каждого из них позволяет не только управлять видом АЧХ и ФЧХ излучений, но и подчеркивать нужные спектральные составляющие излучаемых импульсных сигналов (подобно тому, как дельфины формируют разные по структуре импульсы в пределах основного конуса ХН). Управление характером возбуждения в низковольтных цепях формирования сигналов (в том числе с помощью персонального компьютера (ПК)) позволяет учитывать, а в случае необходимости – компенсировать различный характер нагруженности преобразователей при их работе в составе антенны.

На рис. 4 показаны принцип построения преобразователей и схема возбуждения макетов антенн, составленных из стержневых двухсекционных ПФВ (1 и 2 – секции пьезостержней длиной  $l_1$  и  $l_2$  соответственно; 3 – фронтальная накладка), а на рис. 5 – макетов антенн, составленных из

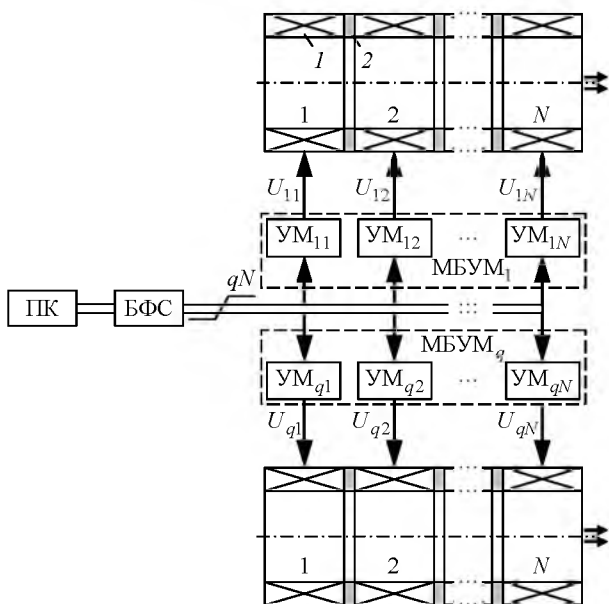


Рис. 5

ПВТ (1 – пьезоцилиндры; 2 – акустически гибкие прокладки). Основным устройством формирования необходимых сигналов возбуждения с учетом фазовых сдвигов между ними является управляющий ПК, который формирует цифровые коды сигналов, необходимых для возбуждения ПФВ и ПВТ, в соответствии с решением задачи синтеза для каждого типа преобразователей с использованием прямого и обратного преобразований Фурье. Многоканальный блок формирования сигналов (БФС) является многоканальным цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) с функцией перезаписи пачки сформированных ПК сигналов в собственную оперативную память и представления их в аналоговой форме. После однократной записи БФС может работать независимо от компьютера, выдавая с заданным периодом следования пачку необходимых сигналов на предварительные усилители многоканального блока усиления мощности (МБУМ). С выхода МБУМ сформированные сигналы возбуждения подаются на соответствующие части (секции) пьезостержневой ПФВ или пьезоцилиндры ПВТ, входящие в состав антенн. При необходимости сканирования ХН для макетов антенн время задержки (компенсации) сигналов соседних преобразователей задается программно в ПК и находится из соотношения  $\tau = [d_{\text{мц}}(q-1)\sin\theta]/c_0$ , где  $d_{\text{мц}}$  – межцентровое расстояние между апертурами соседних преобразователей;  $q$  – текущий номер преобразователя в антенне вдоль выбранной координаты;  $\theta$  – угол компенсации ХН;  $c_0$  – скорость звука в воде.

Проведение комплексных экспериментальных исследований полевых характеристик разработанных макетов антенн, составленных из ПФВ и ПВТ, а также системы их возбуждения стало возможным благодаря введению в эксплуатацию на кафедре ЭУТ заглушенного гидроакустического

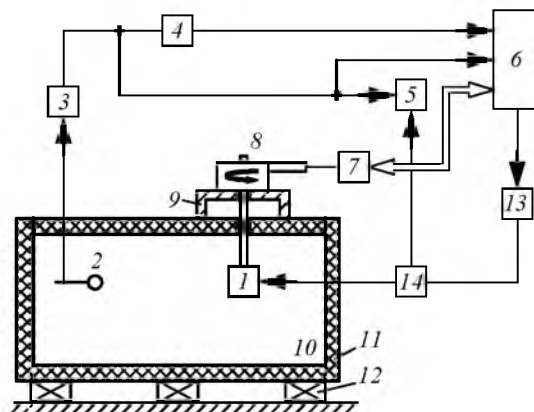


Рис. 6

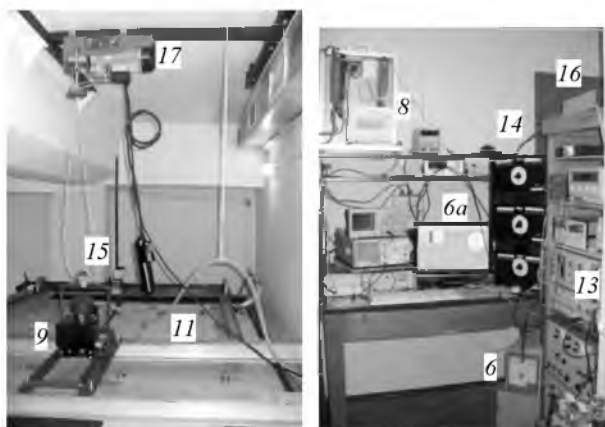


Рис. 7

бассейна с программно-управляемым поворотным устройством (ПУ) и контрольно-измерительным стендом, позволяющими автоматизировать процессы измерения ХН и АЧХ макетов для различных режимов их возбуждения. Блок-схема измерительной установки представлена на рис. 6, где 1 – исследуемая антенна; 2 – гидрофон; 3 – усилитель; 4 – АЦП; 5 – цифровой осциллограф; 6 – управляющий компьютер; 7 – приводной преобразователь для управления ПУ; 8 – программно-управляемое ПУ с платформой 9; 10 – гидроакустический бассейн с заглушающим покрытием 11; 12 – амортизирующие опоры; 13 – генератор специальных сигналов или БФС; 14 – МБУМ.

Бассейн (рис. 7, а) снабжен также креплением 15 для гидрофона 1, позволяющим перемещать его по трем координатам, и лебедкой 17 с блоком управления. Контрольно-измерительный стенд (рис. 7, б), помимо ранее указанных приборов, содержит стойку 16 с дополнительной измерительной аппаратурой, а также управляющий ПК 6, на экране монитора 6а которого отображаются панели виртуального прибора [14], [15], специально разработанного в среде LabVIEW для управления и контроля процесса измерения.

Пример отображения панели виртуального прибора представлен на рис. 8. В зонах 1–3 сосредоточены функции управления поворотным устройством. Переключателями 4 определяется вид панелей управления и визуального контроля измеряемых характеристик. Переключателем 5 устанавливается задержка для учета времени распространения акустического импульса от антенны до гидрофона. На виртуальном осциллографе 6 отображается принятый сигнал в реальном масштабе времени, а также выбирается положение строба. Угол поворота антенны отображается индикатором 7.

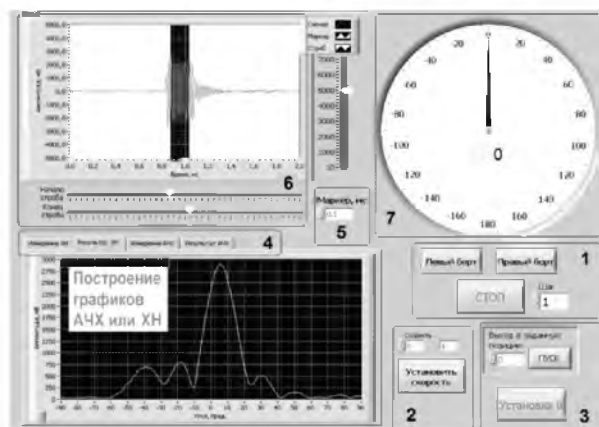


Рис. 8



Рис. 9

Рассмотрим некоторые результаты исследований макетов антенн (рис. 9). Макеты 1–3 составлены из ПВТ, содержащих разные по числу и размерам пьезоцилиндры. Макеты 4–7 представляют собой двухсекционные стержневые ПФВ с разным разделением на секции.

На рис. 10 показаны АЧХ звукового давления, создаваемого макетами 5 и 7 со стержневыми ПФВ, приведенного к амплитуде возбуждающего напряжения 1 В и расстоянию 1 м, в режимах

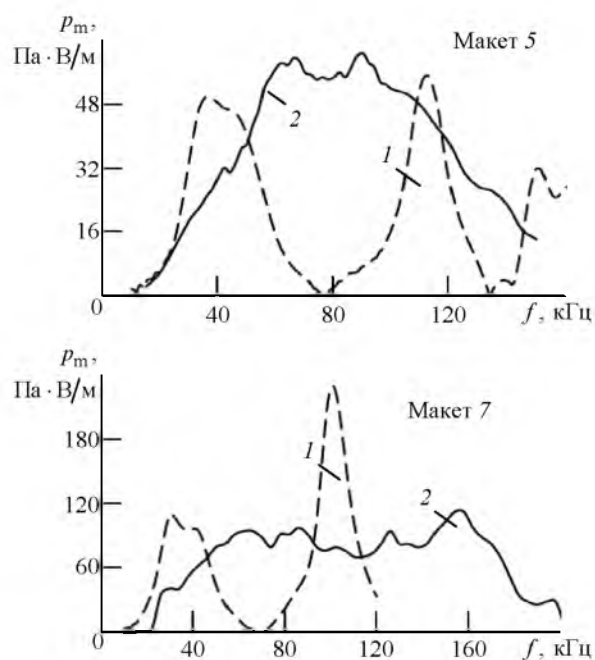


Рис. 10

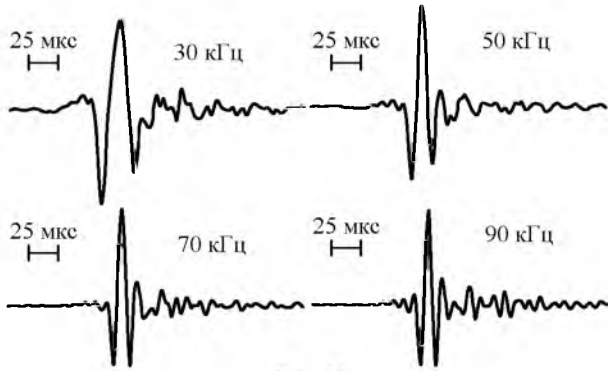


Рис. 11

синфазного (кривая 1) и фазированного возбуждений в соответствии с решением задачи синтеза (кривая 2). Длины секций пьезостержней макета 5 соотносятся как  $l_1:l_2=1:1$ , макета 7 – как  $l_1:l_2=3:1$ . Во втором случае удастся дополнительно увеличить диапазон рабочих частот, охватывая при этом область от первой до пятой мод продольных колебаний.

При синфазном возбуждении пьезостержней ПФВ излучение происходит лишь в областях первой и третьей мод продольных колебаний пьезостержня. Причем самый короткий акустический импульс (4–5 периодов задающей частоты) при возбуждении преобразователя однопериодным импульсом получается в области первой моды, соответствующей полуволновому резонансу пьезостержня (для макетов 4–7 частота полуволнового резонанса  $f_p \approx 35...40$  кГц), когда функциональна используемая фронтальная согласующая накладка. Перестройка по частоте этого акустического импульса без увеличения его длительности возможна в очень узкой полосе ( $\pm 5\%$ ) относительно резонансной частоты  $f_p$ . Фазированное возбуждение в соответствии с решением задачи синтеза позволяет не только расширить диапазон рабочих частот преобразователя до 2 октав, но и обеспечить в этом диапазоне формирование ультракоротких (1–1.5 периода колебаний) акустических импульсов  $s_{ак}(t)$ , перестраиваемых по частоте [5]. На рис. 11 приведены формы акустических импульсов, излученных макетом 5 при его фазированном возбуждении однопериодным импульсом в соответствии с решением задачи синтеза. Импульсы фиксировались четырехлучевым осциллографом Tektronix TDS 2024B с последующей записью на USB-флэш-накопитель.

На рис. 12 показано формирование сигнала, аналогичного коммуникационному импульсу белухи, с помощью макета 7. С учетом реального

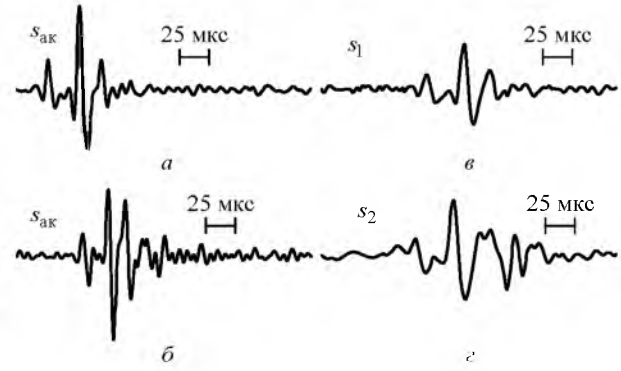


Рис. 12

сигнала белухи, прошедшего оцифровку (рис. 12, а), и решения задачи синтеза получены сигналы возбуждения  $s_1(t)$  (рис. 12, в) и  $s_2(t)$  (рис. 12, з), подаваемые на секции 1 и 2 макета 7 (рис. 9) соответственно. Излученный макетом 7 акустический импульс (рис. 12, б) в целом достаточно близок по форме к оригиналу, однако ограниченность по полосе пропускания (порядка 2 октав) и наличие плоскопараллельных торцов преобразователей, способствующих возникновению переотражений, по-видимому, приводят к проявлению послезвучания.

ПВТ, состоящие из пьезоцилиндров с акустически более гибкой колебательной системой, позволяют получить полосу пропускания до 3–3.5 октав и обеспечить лучшее приближение к заданной форме акустических импульсов [11], [12]. Благодаря возбуждению, реализующему режим бегущей во фронтальном направлении волны, излучение ПВТ в тыльном направлении существенно ослабляется. На рис. 13 представлены результаты расче-

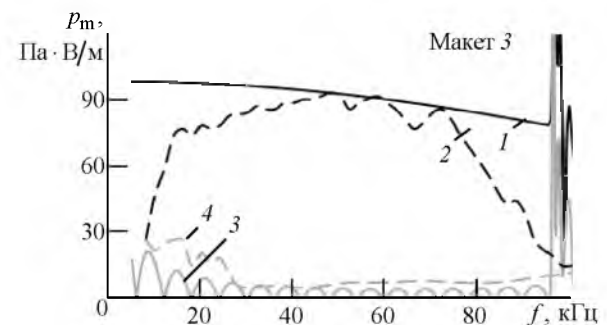
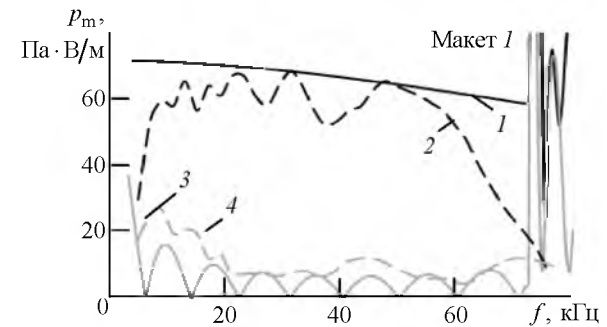


Рис. 13

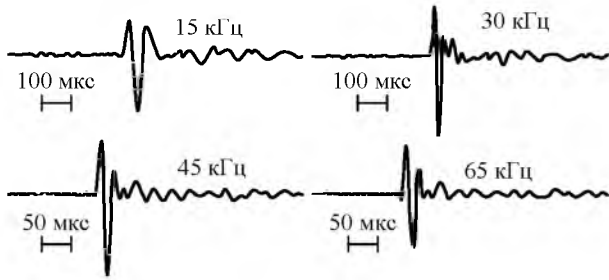


Рис. 14

та и измерения АЧХ звукового давления, приведенного к амплитуде возбуждающего напряжения 1 В и расстоянию 1 м, во фронтальном и в тыльном направлениях для макетов 1 ( $N=10$ ) и 3 ( $N=20$ ), составленных из ПВТ, при их возбуждении в соответствии с решением задачи синтеза. Полоса пропускания в основном диапазоне частот ПВТ, в котором формируются квазиплоские волны, измеренная по уровню  $-3$  дБ, для этих макетов составляет 3.1 и 2.9 октавы соответственно. С увеличением числа  $N$  пьезоцилиндров увеличивается уровень излучения во фронтальном направлении и уменьшаются – в тыльном.

В области низких частот уменьшение измеренного звукового давления во фронтальном направлении по сравнению с расчетным обусловлено ограничениями имеющейся аппаратуры: невозможностью получения амплитуд возбуждающих пьезоцилиндры электрических напряжений, требуемых в соответствии с решением задачи синтеза [11]. В области высоких частот ограничивающим фактором служит возникновение нормальной моды первого порядка.

На рис. 14 иллюстрируется возможность перестройки по частоте ультразвуковых акустических импульсов  $s_{ак}(t)$  макетом 1 при фазированном возбуждении его ПВТ однопериодным импульсом.

Рис. 15 иллюстрирует формирование с помощью этого же макета сигнала, аналогичного эхолокационному импульсу дельфина: *a* – реальный эхолокационный сигнал дельфина, записанный при работе с животным; *б* – акустический импульс  $s_{ак}(t)$ , полученный в результате расчетов в соответствии с решением задачи синтеза; *в* – результаты расчетов нормированных АЧХ излучения для макета 1 во фронтальном (кривая 1) и тыльном (кривая 2) направлениях, а также спектр сигнала дельфина  $\Phi_c$  (кривая 3). Для макетов ПВТ ввиду их сравнительной низкочастотности реальные импульсы дельфина, предоставленные в цифровой записи, были промасштабированы по частоте таким образом, чтобы основная область спектра  $\Phi_c$  импульса располагалась в основном диапазоне АЧХ этих макетов (рис. 15, *в*). На рис. 15 также приведены результаты измерений: *г* – импульс возбуждения для десятого пьезоцилиндра  $s_{10}(t)$  (см. рис. 5,  $N=10$ ) и акустический импульс  $s_{ак}(t)$  (задержка между импульсами и соотношение их размахов определяются параметрами измерительной установки); *д* – акустический импульс  $s_{ак}(t)$  в более крупном временном масштабе; *е* – спектр  $\Phi_c$  излученного макетом 1 акустического импульса (в логарифмическом

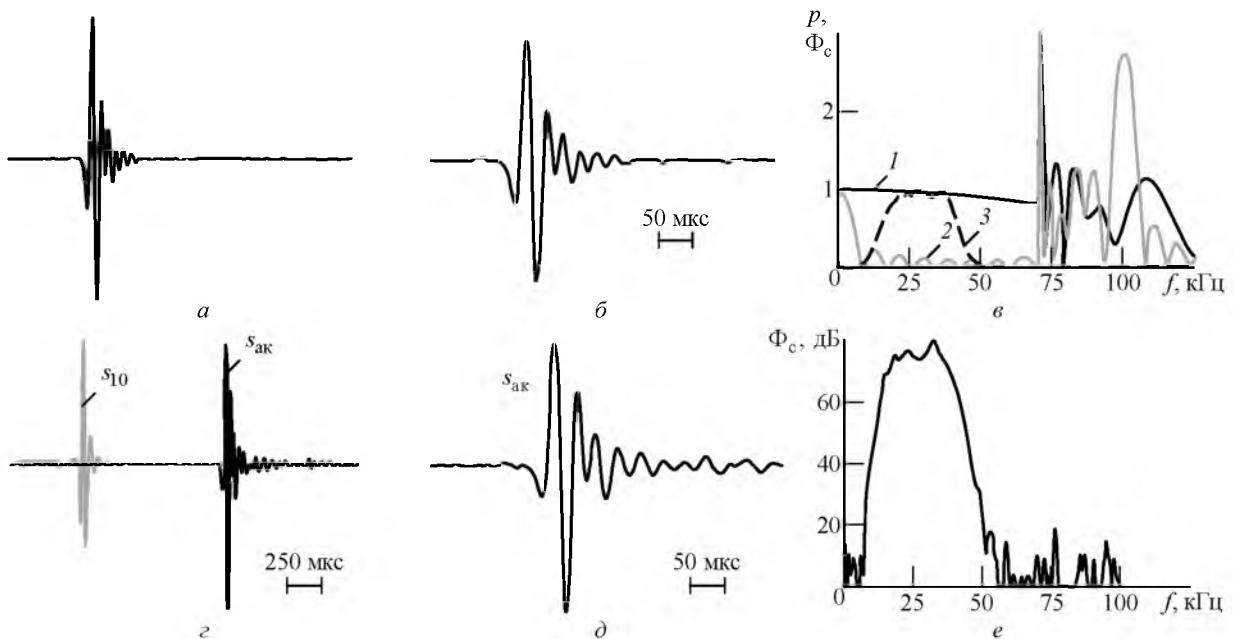


Рис. 15

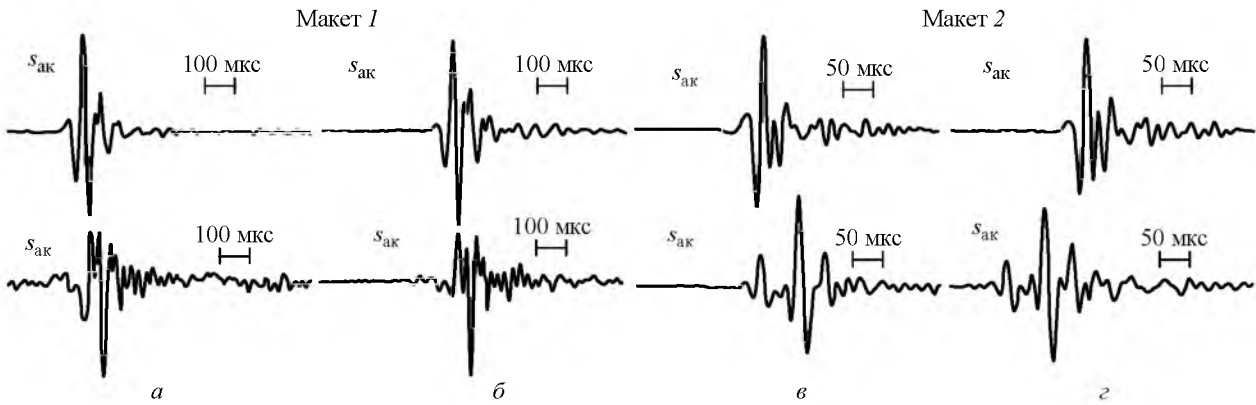


Рис. 16

масштабе по оси ординат).

Имитационные возможности ПВТ при излучении эхолокационных и коммуникационных импульсов дельфинов (верхний ряд) и белух (нижний ряд) с помощью макетов 1 и 2 показаны также на рис. 16: а, в – расчетные акустические импульсы  $s_{ак}(t)$ , полученные после масштабирования; б, г – экспериментально полученные акустические импульсы. Визуальное сопоставление реальных сигналов дельфинов (белух) и полученных экспериментально акустических импульсов, излученных макетами ПВТ, показывает их вполне удовлетворительное соответствие даже для сравнительно сложно формируемой последовательности полупериодов одной полярности.

Оценка уровня излучения по результатам измерения полевых и импульсных характеристик исследуемых макетов показала способность обеспечения достаточно эффективной их работы с удельной мощностью излучения порядка  $1...2 \text{ Вт/см}^2$  (при использовании ПВТ) в диапазоне частот до 3 октав или с удельной мощностью излучения  $4...8 \text{ Вт/см}^2$  и более (при использовании стержневых ПФВ) в диапазоне частот до 2 октав.

ГАС, созданные на базе предложенных решений, могут быть использованы в станциях обна-

ружения различного назначения, в том числе для классификации объектов по характеру изменения их отражательной способности, в системах звукоподводной связи с повышенной информативностью и скрытностью, а также при разработке систем обучения и управления поведением китообразных.

Дальнейшие исследования по совершенствованию разрабатываемых принципов построения ПФВ и ПВТ, а также системы их возбуждения могут быть направлены, например, на повышение быстродействия БФС и уменьшение влияния каналов на работу друг друга, особенно при большой емкостной нагрузке; разработку альтернативных быстродействующих коммутирующих устройств, способных формировать заданные сложные импульсы возбуждения, например, перспективным направлением здесь может быть построение усилителей мощности на ключевых элементах и с использованием широтно-импульсной модуляции; разработку методики и критериев сравнения реальных сигналов китообразных и сформированных с помощью разрабатываемой ГАС. В этой связи целесообразна кооперация с профильными организациями, такими как ОАО «Концерн "Океанприбор"», ОАО «Концерн "МПО – Гидроприбор"» и ЗАО «НПЦ "Акварин"» (Санкт-Петербург), ОАО «ГНПП "Регион"» (Москва).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов А. А. Учиться у дельфинов. URL: <http://www.den-za-dnem.ru/page.php?article=325> (Дата посещения 10.04.2016).
2. Иванов М. П., Степанов Б. Г. Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика: сб. науч. тр.* СПб.: Наука, 2011. Т. 4, № 3. С. 108–122.
3. Степанов Б. Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // *Акустический журн.* 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.

4. Пат. RU 2485715 С1. Н04R1/44 (2006.01). Способ возбуждения стержневого гидроакустического преобразователя / Б. Г. Степанов; опубл. 20.06.2013. Б. и. № 17.
5. Степанов Б. Г. Об экспериментальных исследованиях широкополосных стержневых преобразователей с фазированным возбуждением двух секций // *Тр. XII Всерос. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики"*, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2014 г. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 444–448.
6. Пат. RU 1723972 С. МПК 5 Н04R1/44, Н04R17/00. Гидроакустический преобразователь / Д. Б. Дианов,



Б. Г. Степанов, В. Б. Малахов, В. Н. Душаткин, Ю. Л. Тиссенбаум; опубл. 15.12.1994.

7. Малахов В. Б., Степанов Б. Г. О построении высокоэффективных сверхширокополосных гидроакустических преобразователей // Тр. VI Междунар. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" (ГА 2002), Санкт-Петербург, 28–31 мая 2002 г. СПб.: ФГУП «ЦНИИ "Гидроприбор"», 2002. С. 288–292.

8. Степанов Б. Г. Широкополосный преобразователь волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2008. № 8. С. 39–50.

9. Пат. RU 2393644 С1. H04R1/44, H04R17/00 (2006.01). Гидроакустический преобразователь волноводного типа / Б. Г. Степанов; опубл. 27.06.2010. Б. и. № 18.

10. Пат. RU 2393645 С1. H04R1/44, H04R17/00 (2006.01). Широкополосный гидроакустический преобразователь / Б. Г. Степанов; опубл. 27.06.2010. Б. и. № 18.

11. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 3. С. 87–96.

12. Степанов Б. Г. О возможности дополнительно увеличения рабочего диапазона частот гидроаку-

стического преобразователя волноводного типа и его работы в импульсном режиме. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 4. С. 71–80.

13. Степанов Б. Г. Об излучении одиночным преобразователем волноводного типа через его водозаполненные апертуры в полубесконечные пространства // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. № 4. С. 68–76.

14. Пестерев И. С., Степаненко Н. В., Степанов Б. Г. Разработка контрольно-измерительного стенда для автоматизированного измерения направленных и частотных характеристик гидроакустических антенн // Сб. докл. 67-й науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 2014. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. С. 177–182.

15. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. О расширении функциональных возможностей контрольно-измерительного стенда кафедры ЭУТ для автоматизации измерений частотных и направленных характеристик антенн // Сб. докл. 69-й науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 2016. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. С. 215–220.

B. G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### Bionic acoustic systems and devices

*The biosensor echolocation system of cetaceans is briefly considered. The general schemes of construction and excitation of ultra-wideband antennas, composed of rod two-section transducers with phased excitation, and also transducers waveguide type using the management PC, are resulted. Possibility of reception of a pass-band of an order of 2–3 octaves and radiations of these models of echolocation and communication signals of dolphins and Beluga whales, and also - ultra-short acoustic impulses reconstructed on frequency in the specified band of frequencies is shown.*

Echolocation system of cetaceans, transducer of waveguide type, rod transducer with the phase excitation, short acoustic signal

Статья поступила в редакцию 16 марта 2016 г.