



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

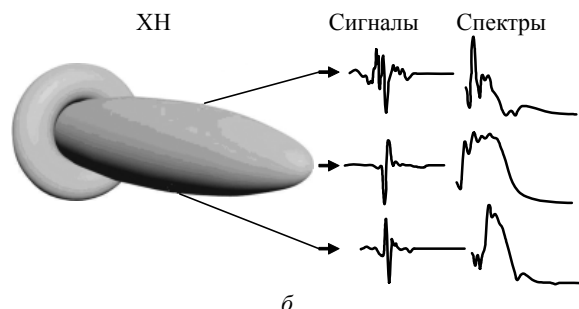
Возможность формирования и управления сложными акустическими сигналами в настоящее время становится все более актуальной. Это связано, прежде всего, с необходимостью разработки методов и технических путей, позволяющих существенно повысить эффективность проектируемых гидроакустических систем (ГАС), например, 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

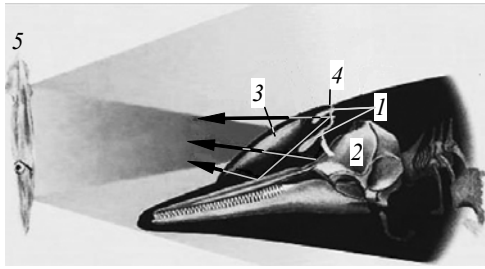


Рис. 2

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

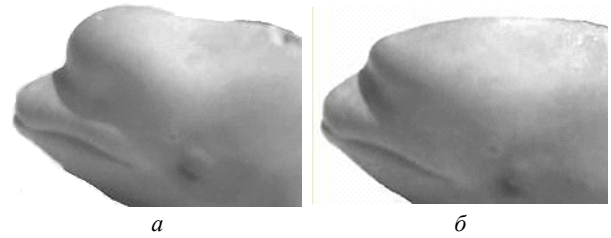


Рис. 3

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

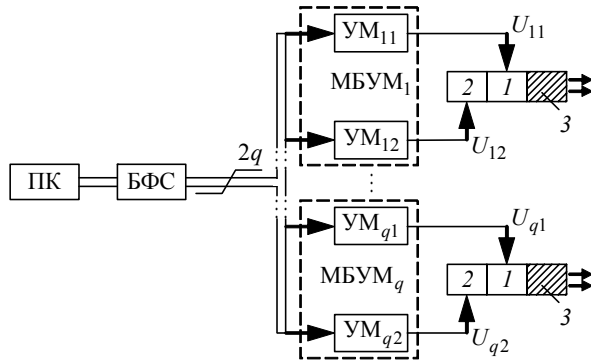


Рис. 4

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

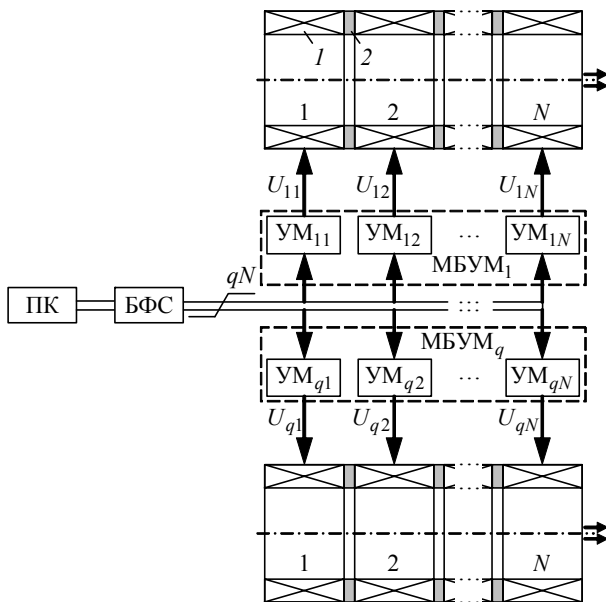


Рис. 5

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) пьезостержней ПФВ или пьезоцилиндров 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; θ – 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

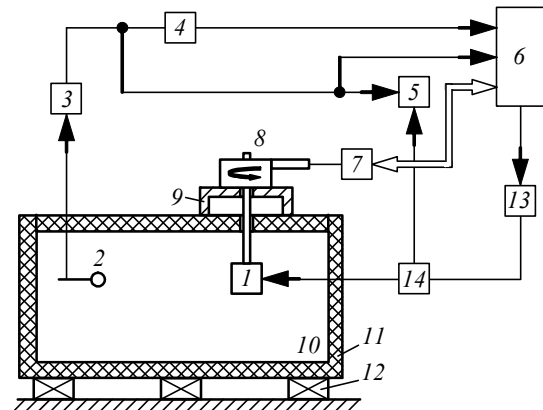


Рис. 6

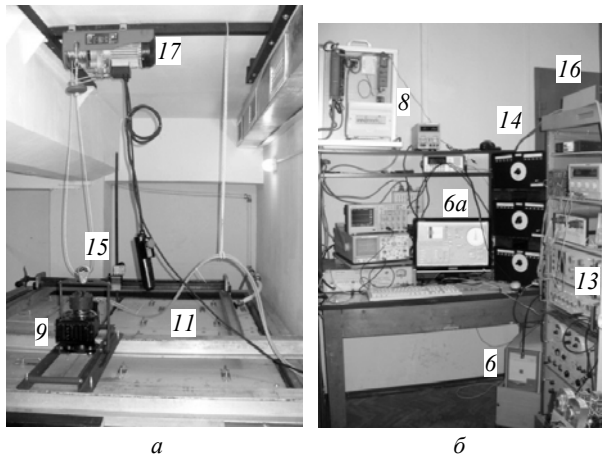


Рис. 7

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 строга. Угол поворота антенны отображается индикатором 7.

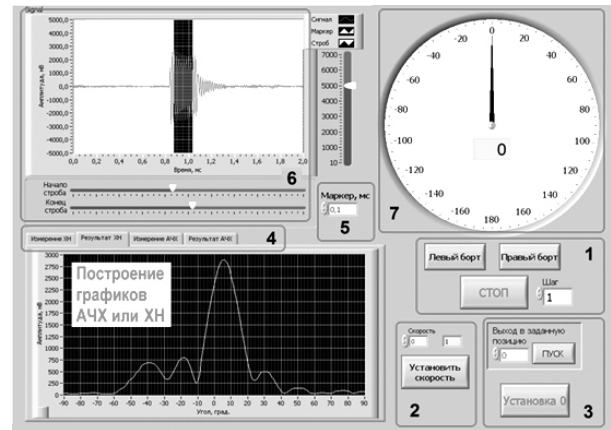


Рис. 8

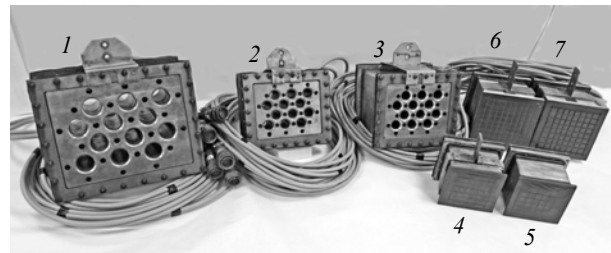


Рис. 9

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

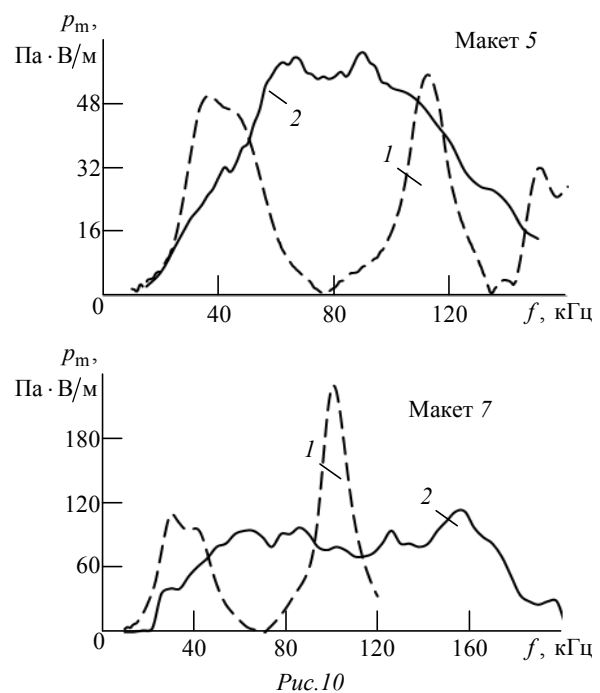


Рис. 10

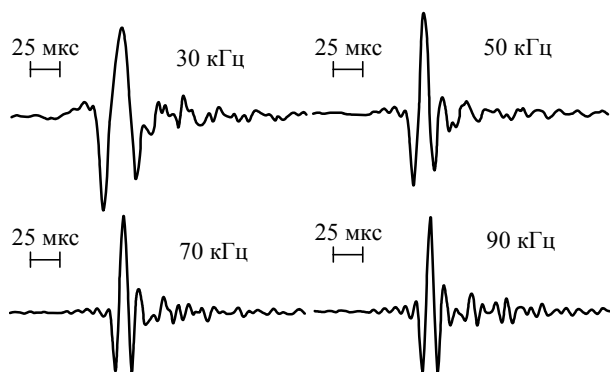


Рис. 11

синфазного (кривая 1) и фазированного возбуждений в соответствии с решением задачи синтеза (кривая 2). Длины секций пьезостержневой 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 пьезостержневой 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

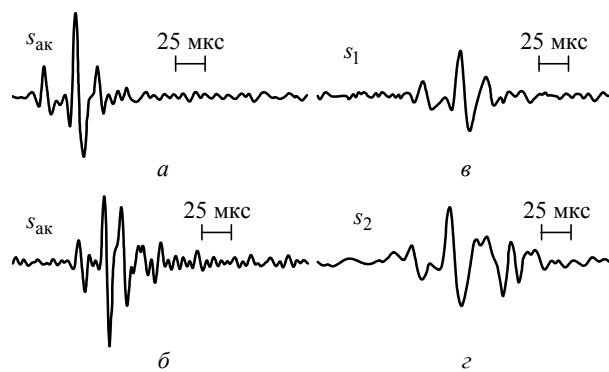


Рис. 12

сигнала белухи, прошедшего оцифровку (рис. 12, а), и решения задачи синтеза получены сигналы возбуждения $s_1(t)$ (рис. 12, б) и $s_2(t)$ (рис. 12, в), 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-

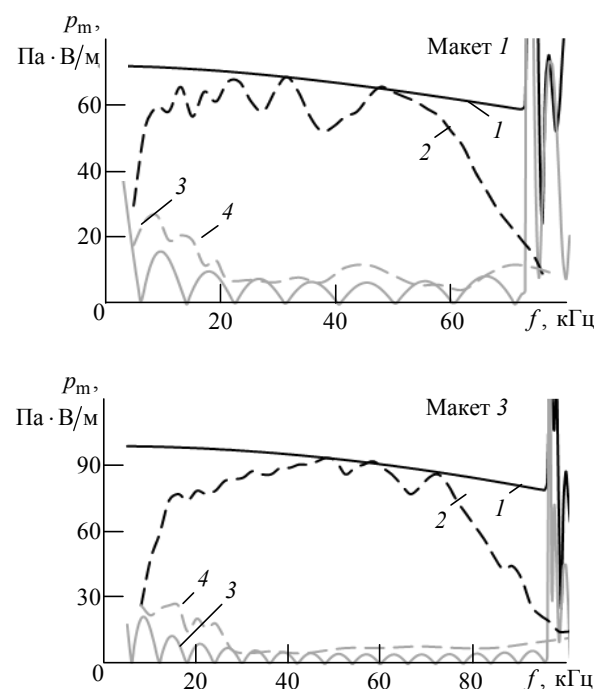


Рис. 13

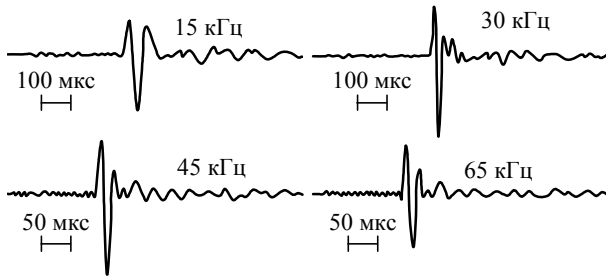


Рис. 14

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: *а* – 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 Φ_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 Φ_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 Φ_c излученного макетом 1 акустического импульса (в логарифмическом

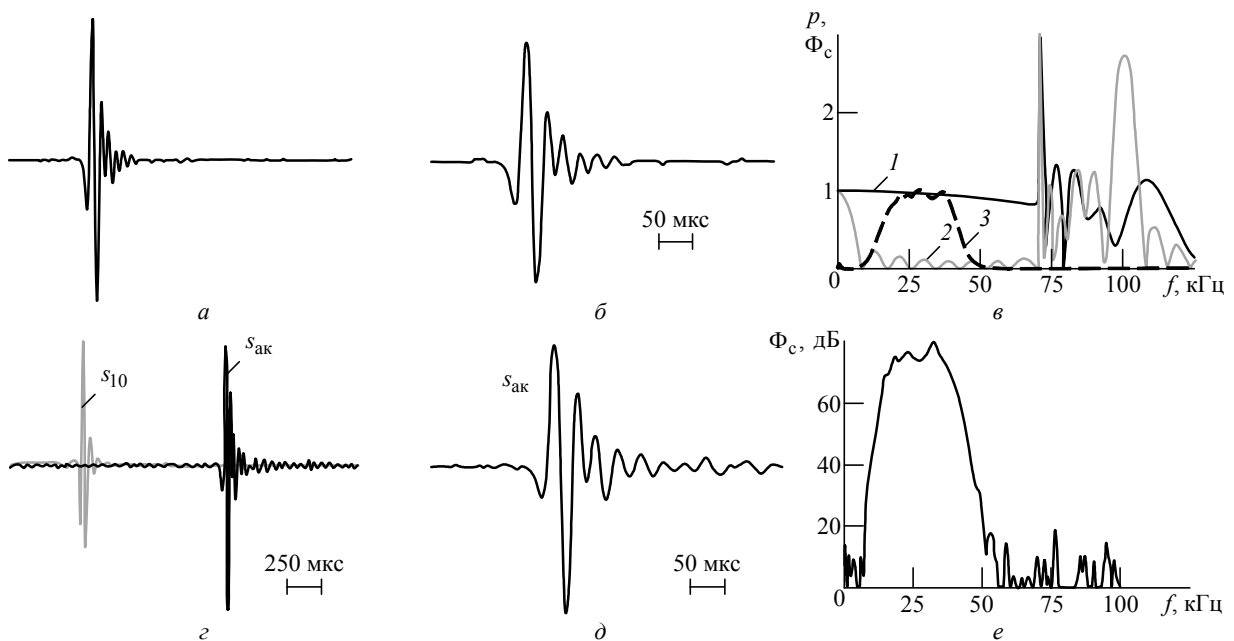


Рис. 15

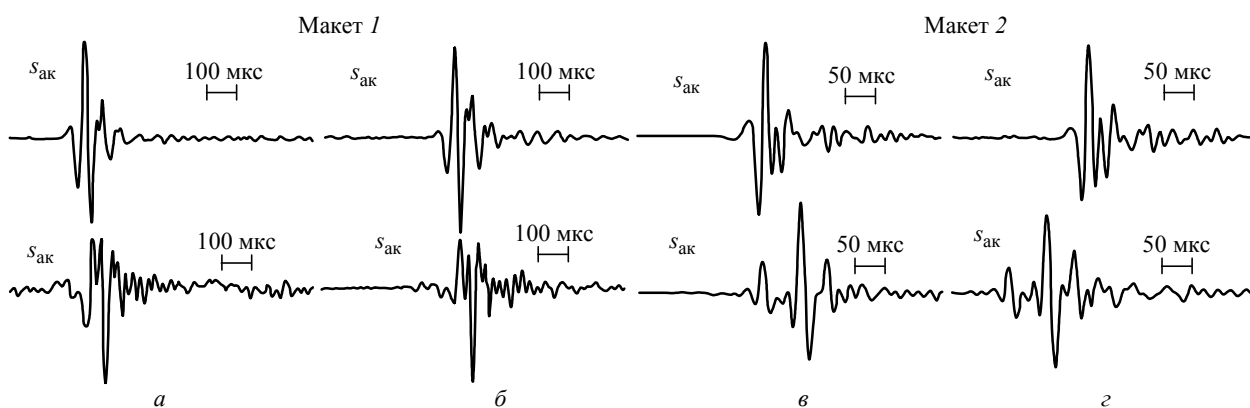


Рис. 16

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: *a*, *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 "Аквamarin"» (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; опублик. 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; опублик. 27.06.2010. Б. и. № 18.

10. Пат. RU 2393645 С1. H04R1/44, H04R17/00 (2006.01). Широкополосный гидроакустический преобразователь / Б. Г. Степанов; опублик. 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.