

V. S. Goryainov, A. A. Buznikov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

V. I. Chernook
«Giprotybflot» JSC

MODIFICATION OF THE BASE SIGNAL METHOD

Transparency of natural waters is an important hydro-optical parameter denoting their bioproductivity and ecological status. A number of optically active components and processes both below the water surface and on it control the absorption and scattering of optical radiation. In practice water turbidity can be described by its diffuse attenuation coefficient. Restoring the latter by the shape of lidar returns (i. e. time dependence of the intensity of scattered radiation) is obscured by the need to account a number of factors, both internal and external. To approximate the return shape by functions derived from optical assumptions, cumbersome computations are required. The paper deals with an experience of approximating lidar returns with a piecewise asymmetric Gaussian function. The process of numerical simulation is described along with the dependencies of the function's parameters on the diffuse attenuation coefficient value.

Lidars, remote sensing of water, signal processing

УДК 534.232

Б. Г. Степанов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Об излучении коротких акустических сигналов стержневыми преобразователями с фазированным возбуждением их двух частей

Приводятся результаты экспериментальных исследований макетов антенн, составленных из стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением двух частей (секций) пьезостержня в соответствии с решением задачи синтеза. Реализация такого возбуждения осуществляется с помощью программно управляемой системы возбуждения и позволяет сформировать близкую к равномерной амплитудно-частотную характеристику излучения и практически линейную фазочастотную характеристику излучения в полосе пропускания порядка 2 октав. Показана возможность излучения в этой полосе перестраиваемых по частоте ультракоротких импульсов, а также возможность управления фазочастотной характеристикой излучения. Рассматривается возможность формирования сигналов, подобных сигналам китообразных, с помощью системы возбуждения и стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением. Дается сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных. Отмечается возможность сохранения требуемых характеристик излучения при изменении параметров пассивных накладок и нагруженности излучающих апертур преобразователей (антенн).

Широкополосный преобразователь, синтез частотных характеристик, короткие акустические сигналы

Вопросам расширения полосы пропускания и связанным с этим задачам получения коротких акустических сигналов посвящено достаточно большое число работ отечественных и зарубежных авторов, отраженных как в оригинальных статьях, так и монографиях [1]–[4], содержащих

обширный список источников по указанным направлениям. Интерес к этим вопросам проявляется в области как дефектоскопии, так и гидроакустики. Это связано с требованиями повышения разрешающей способности и информативности сигналов, отраженных от объектов исследо-

вания. Использование традиционных путей расширения полосы пропускания [5]: акустических согласующих структур, электрических корректирующих цепей, многомодовости колебательной системы преобразователей и т. п., позволяя получить достаточно широкополосные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) излучения, как правило, не обеспечивает линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ) излучения. Последнее обстоятельство ограничивает возможность формирования коротких акустических импульсов и более сложных по структуре акустических сигналов.

Говоря об излучении коротких импульсных сигналов, следует упомянуть методы, базирующиеся на возбуждении преобразователей определенной последовательностью электрических импульсов, обеспечивающих компенсацию свободных колебаний преобразователей [4], [6], [7], а также на использовании необратимых устройств электродинамического [8] и пневматического [9] типов. Все эти решения позволяют формировать короткие акустические импульсы лишь на одной частоте, определяемой механическими свойствами колебательной системы преобразователей, но не дают возможности управления их структурой (формой и длительностью полупериодов).

В [10]–[12] рассматривалась возможность управления частотными характеристиками стержневых преобразователей фазированным возбуждением двух частей (секций) их пьезостержня, и, в частности, формирования широкополосных (порядка 2 октав) АЧХ излучения. Для неискаженной передачи ультракоротких и сложных сигналов преобразователь должен в рабочем диапазоне частот, охватывающем спектр этих сигналов, обеспечивать равномерную АЧХ и линейную ФЧХ излучения, что возможно в рамках решения задачи синтеза [12]. В этом случае, с учетом работы преобразователей с фазированным (амплитудно-фазовым) возбуждением (ПФВ) в составе антенны и достаточной их нагруженности, АЧХ и ФЧХ излучения могут быть заданы с использованием колебательной скорости внешнего фронтального торца преобразователя, например в виде $\dot{\xi}_V(\omega) = N_0 F_V(\omega)$, где N_0 – коэффициент пропорциональности; $F_V(\omega) = F_{Vm}(\omega)e^{j\varphi_V(\omega)}$ определяет передаточную функцию преобразователя с задаваемыми АЧХ излучения $F_{Vm}(\omega)$ и ФЧХ излучения $\varphi_V(\omega)$, ω – круговая частота. АЧХ звуко-

вого давления при этом можно представить в виде $p_V(\omega) = z_v |\dot{\xi}_V(\omega)|$, где z_v – импеданс среды, в которую происходит излучение. По заданным равномерной АЧХ и линейной ФЧХ излучения для расчетной модели ПФВ однозначно определяется частотная зависимость отношения электрических напряжений $U_V(\omega) = U_2(\omega)/U_1(\omega)$, возбуждающих части (секции) 1 и 2 пьезостержня, где $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}$, $U_{im}(\omega)$ – амплитуды и $\varphi_i(\omega)$ – фазы, $i = 1, 2$.

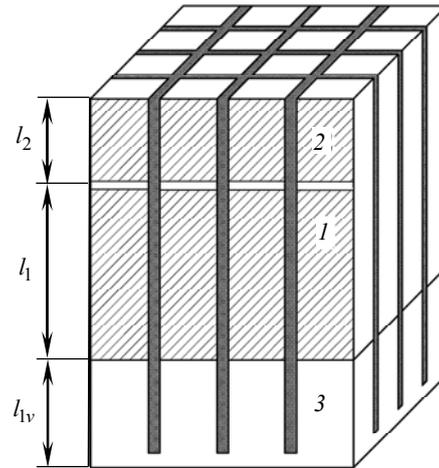


Рис. 1

В [12] было показано, что рабочий диапазон ПФВ зависит от выбора значения параметра $p = l_1/L$, где l_1 и $L = l_1 + l_2$ – длины первой части (секции) и всего пьезостержня. В данной статье ограничимся рассмотрением результатов экспериментальных исследований и соответствующих им расчетов для ПФВ, содержащих фронтальную накладку 3 и пьезостержень, электрически разделенный на две части (секции) 1 и 2 согласно значениям параметра $p = 0.5$ и $p = 0.75$ (рис. 1). Для этих значений параметра p (см., например, [12, рис. 4]) целесообразно задавать равномерную АЧХ излучения в диапазоне частот соответственно: $\psi \approx 0.8\pi \dots 3.2\pi$ и $\psi \approx 1.7\pi \dots 6.6\pi$. Здесь $\psi = kL$, $k = \omega/c_k$, c_k – скорость звука в материале пьезостержня.

Экспериментально исследовались макеты (антенны), построенные в соответствии со схемой на рис. 1 и содержащие разное число N ПФВ, пьезостержни которых были выполнены из пьезокерамики ЦТСНВ-1 и ЦТБС-3 с поперечным пьезоэффектом. Последнее обстоятельство связа-

но с относительной простотой изготовления макетов. Фронтальные накладки макетов выполнялись из углепластика марки УГЭТ с удельным импедансом $z_{1v} \approx 4.6 \cdot 10^6$ Па · с/м и с различными значениями относительных волновых размеров $a_{1v} \approx 0.25; 0.4; 0.48$, которые определялись относительно полуволнового резонанса пьезостержня f_p при его синфазном возбуждении ($U_{21}(\omega) = 1$ и $\Delta\phi_{21}(\omega) = 0$). Для удобства сопоставления в данной работе использованы те же обозначения, что и в [12], в частности: $a_{1v} = \psi_{1v}/\psi = c_k l_{1v}/(c_{1v} L)$; $\psi_{1v} = k_{1v} l_{1v}$; $k_{1v} = \omega/c_{1v}$, где l_{1v} и c_{1v} – длина и скорость звука в материале фронтальной накладки. Здесь следует отметить, что возбуждение ПФВ в соответствии с решением задачи синтеза позволяет использовать пассивные накладки с различными параметрами, а также учитывать изменение характера нагруженности как одиночных ПФВ, так и при их работе в составе антенн [13].

В общем случае частотные зависимости отношения амплитуд $U_{21}(\omega) = U_{2m}(\omega)/U_{1m}(\omega)$ и разности фаз $\Delta\phi_{21}(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)$ возбуждающих электрических напряжений, обеспечивающих заданный вид АЧХ и ФЧХ излучения для $\xi_V(\omega)$ или $p_V(\omega)$, достаточно сложны для реализации с помощью аналоговых устройств [12]. Однако если использовать преобразование Фурье и представление электрических сигналов, возбуждающих части (секции) 1 и 2 пьезостержня ПФВ в виде $u_1(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_1(\omega) e^{j\omega t} d\omega$ и

$$u_2(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_2(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{соответственно,}$$

то это позволит значительно упростить задачу формирования и излучения как коротких, так и сложных акустических сигналов. Здесь $\Phi(\omega)$ – спектральная

функция сигнала, который требуется излучить; ω_B – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектральных составляющих в $\Phi(\omega)$, например по уровню $\Phi_{\min}(\omega_B)/\Phi_{\max}(\omega) \leq 0.1$; $\Phi_{\max}(\omega)$ и $\Phi_{\min}(\omega_B)$ – максимальное и минимальное значения амплитуд спектральных составляющих в $\Phi(\omega)$. Поскольку в принятом виде записи отношения $U_V(\omega) = U_2(\omega)/U_1(\omega)$ электрическое напряжение $U_1(\omega)$ выбрано в качестве опорного, то, в частности, можно положить $U_1(\omega) = \operatorname{const} = A_0$ и считать, что электрическое напряжение $U_2(\omega)$ – корректирующее, т.е. $U_2(\omega) = A_0 U_V(\omega)$. В этом случае электрический сигнал возбуждения $u_1(t)$ будет по форме соответствовать акустическому сигналу $s_{\text{ак}}(t)$, который требуется излучить с помощью ПФВ, а электрический сигнал возбуждения $u_2(t)$, как уже указывалось, будет корректирующим.

Структурная схема возбуждения двухсекционного стержневого ПФВ показана на рис. 2. Алгоритм ее работы заключается в том, что с помощью управляющей ПЭВМ 7 для выбранной расчетной модели ПФВ и заданным значениям его параметров, заданных АЧХ и ФЧХ излучения, а также спектральной функции $\Phi(\omega)$ сигнала, который предполагается излучить, определяют в цифровом коде сигналы возбуждения $u_1(t)$, $u_2(t)$ и акустического

$$\text{сигнала } s_{\text{ак}}(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) F_V(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad \text{вид}$$

которых также служит для контроля реальных сигналов возбуждения и излучения. Блок формирования сигналов (БФС) 6 производит считывание из ПЭВМ и синхронное преобразование сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ в их аналоговую форму. После формирования аналоговых сигналов возбуждения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ БФС может работать

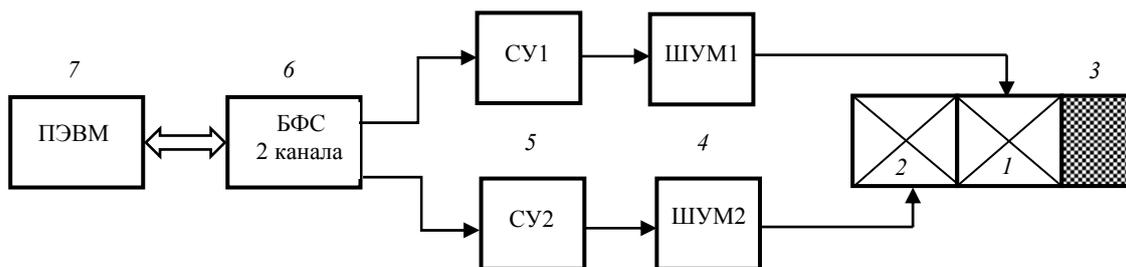


Рис. 2

независимо от ПВЭМ, вырабатывая эти сигналы с выбранным периодом следования. Затем сигналы возбуждения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ подаются через согласующие усилители (СУ) 5 и широкополосные усилители мощности (ШУМ) 4 на соответствующие части (секции) 1 и 2 пьезостержня ПФВ.

Непосредственное измерение ФЧХ излучения является достаточно трудоемкой задачей, поэтому в данной работе ограничимся опосредованной оценкой ее линейности по результатам измерения АЧХ излучения ряда макетов, составленных из ПФВ, а также формируемых ими акустических импульсов, которые реализуются при возбуждении ПФВ в соответствии с решением задачи синтеза.

При использовании квазигармонического режима возбуждения (с помощью радиоимпульсов, содержащих 10–12 периодов колебаний на текущей частоте f) на рис. 3 и 4 показаны АЧХ звукового давления, приведенного к 1 м и 1 В, для макетов антенн 1 и 2, составленных из ПФВ. Конструктивные параметры для макета 1 были: $p = 0.5$; $a_{1V} \approx 0.48$; $\gamma_{1V} \approx 1.2$; $f_p \approx 40.3$ кГц; $N = 5 \times 6$; состав ЦТСНВ-1, а для макета 2 – $p = 0.75$; $a_{1V} \approx 0.48$; $\gamma_{1V} \approx 1.6$; $f_p \approx 34.3$ кГц; $N = 8 \times 8$; состав ЦТБС-3, где $\gamma_{1V} = S_{1V}/S$; S_{1V} и S – площади поперечного сечения фронтальной накладки и пьезостержня. Измерения проводились в заглушенном гидроакустическом бассейне в дальней зоне с использованием калиброванного гидрофона ТС4034-1 (фирма «Reson», рабочий диапазон частот 0.001...470 кГц). Экспериментальные АЧХ звукового давления показаны для двух способов возбуждения пьезостержней ПФВ:

синфазного (кривая 1) и фазированного в соответствии с решением задачи синтеза (кривая 2). В последнем случае уровень излучения задавался тем, который соответствует уровню излучения этих макетов в области резонансной частоты f_p пьезостержней при их синфазном возбуждении. Кривые 3 и 4 соответствуют результатам расчетов для указанных способов возбуждения. При синфазном возбуждении пьезостержней макеты 1 и 2 работают на нечетных модах продольных колебаний (первой, третьей и т. д.), а при фазированном дополнительно проявляются четные моды продольных колебаний (для $p = 0.5$ – вторая, шестая и т. д.; для $p = 0.75$ – вторая, четвертая, шестая и т. д.) [12]. Это позволяет при возбуждении пьезостержней ПФВ в соответствии с решением задачи синтеза получать АЧХ с достаточно эффективным излучением в диапазоне частот порядка 2 октав. ФЧХ излучения при выполнении расчетов и измерений задавалась в виде $\varphi_V(\omega) = \psi$. Изменение характера задания ФЧХ излучения практически не отражалось на результирующей характеристике – АЧХ излучения исследуемых макетов, но сказывалось на виде корректирующего сигнала $u_2(t)$, изменяющегося в зависимости от выбранного закона изменения ФЧХ излучения и частоты формирования акустического сигнала (радиоимпульса).

Рассмотрим возможность формирования перестраиваемых по частоте коротких акустических сигналов с помощью ПФВ, возбуждаемых в соответствии с решением задачи синтеза. В качестве примера на рис. 5 для макета 1 приведены экспериментально полученные сигналы возбуждения

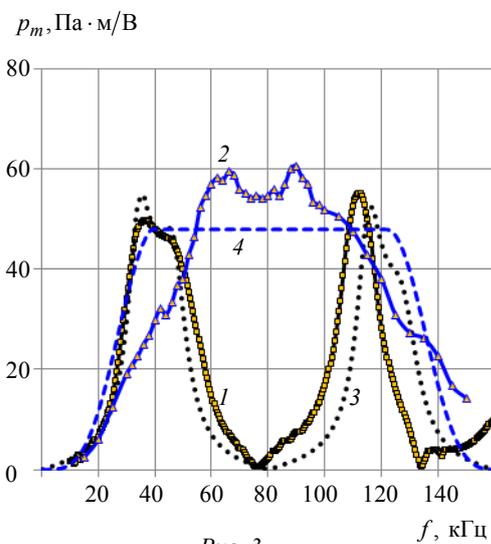


Рис. 3

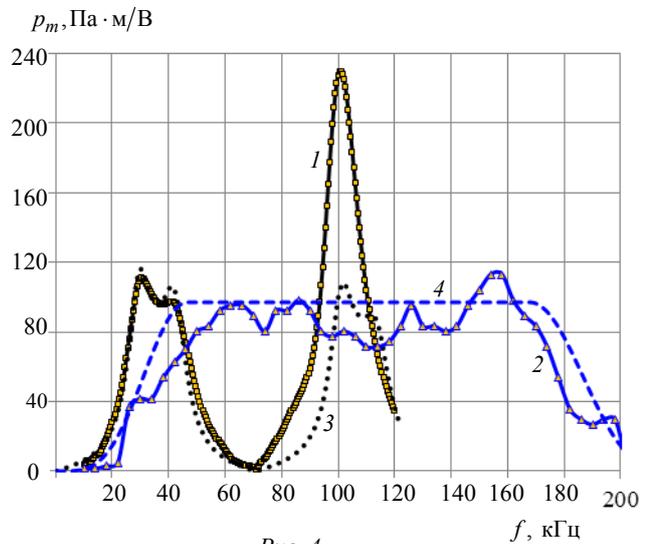


Рис. 4

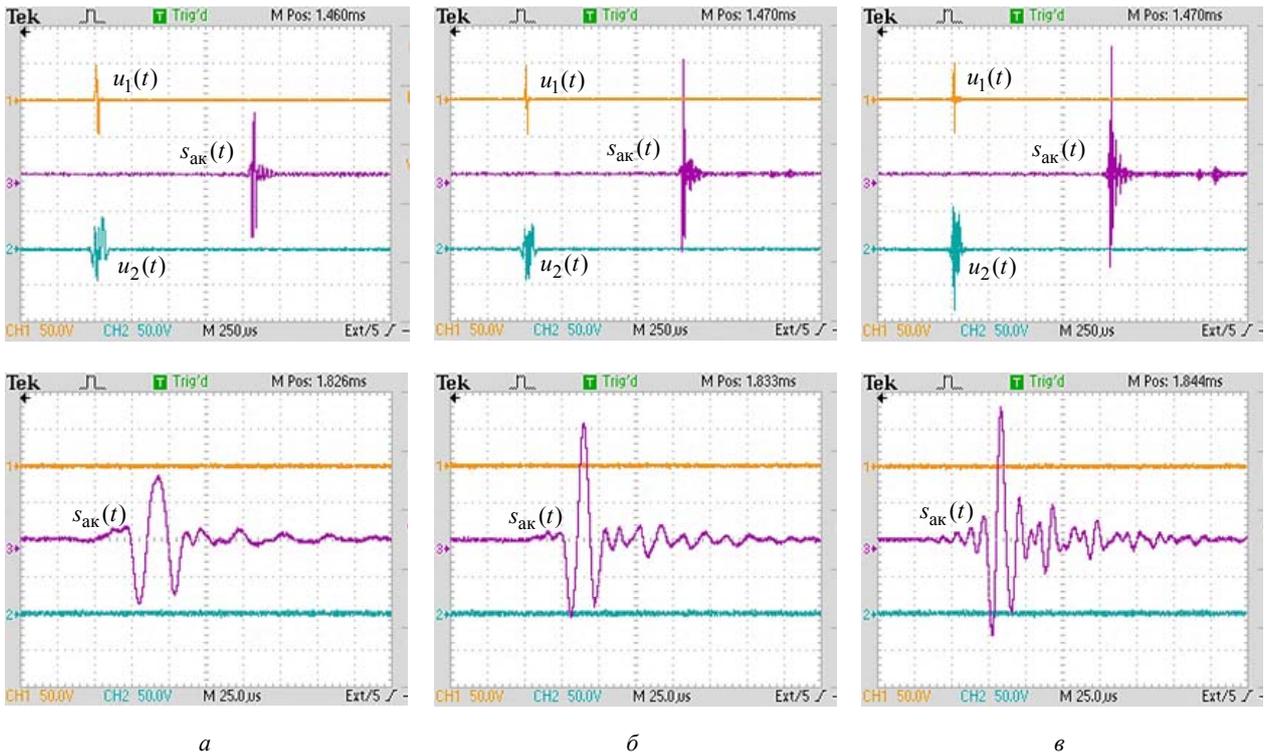


Рис. 5

$u_1(t)$ и $u_2(t)$, сформированные с помощью БФС, а также акустические сигналы $s_{ак}(t)$, представленные для удобства сопоставления с использованием двух масштабов развертки: 250 мкс/дел. (общий вид) и 25 мкс/дел. (только акустический сигнал $s_{ак}(t)$). Опорный сигнал $u_1(t)$ здесь выбран в виде однопериодного импульса, задаваемого для трех разных частот f его формирования: $a - f = 40$ кГц; $б - f = 65$ кГц; $в - f = 90$ кГц. Амплитуда этого импульса была выбрана равной $A_0 = 50$ В. Регистрация результатов измерений выполнена с помощью записи полученного изображения сигналов с помощью цифрового осциллографа *Tektronix* на флэш-накопитель USB. Экспериментально полученные акустические сигналы $s_{ак}(t)$ содержат 1.5 периода колебаний на выбранной частоте, т. е. на один полупериод больше, чем требуется. При необходимости, выбрав в качестве опорного сигнала $u_1(t)$ полупериодный импульс, можно получить симметричный однопериодный акустический сигнал $s_{ак}(t)$, однако в этом случае потребуется увеличение амплитуды корректирующего сигнала $u_2(t)$ в 2–3 раза.

Расчетные аналоги приведенных на рис. 5 акустических сигналов $s_{ак}(t)$ с учетом заданной АЧХ излучения (рис. 3, кривая 4) получаются ближе к заданному однопериодному импульсу. Так, на рис. 6 для значений частот, указанных для

рис. 5, показаны нормированные акустические сигналы $s_{ак}(t)$ и сигналы возбуждения $u_1(t)$ и $u_2(t)$, рассчитанные по приведенным ранее формулам с учетом конструкции и параметров ПФВ макета 1. Для сигналов возбуждения выполнено нормирование к амплитуде однопериодного опорного импульса $u_1(t)$. Амплитуда акустических сигналов $s_{ак}(t)$ определяется заданным уровнем излучения АЧХ на ее равномерном участке. Небольшие осцилляции на краях акустических сигналов (особенно для частот их формирования, близких к высокочастотному краю равномерного участка АЧХ) обусловлены заданными ограничениями АЧХ излучения для ПФВ. При увеличении диапазона частот с равномерным участком АЧХ излучения (например, задав во всем диапазоне частот $F_{Vm}(\omega) = \text{const}$) эти осцилляции для расчетных акустических сигналов $s_{ак}(t)$ исчезают. Однако применять этот подход на практике затруднительно ввиду указанного в [12] очень резкого роста значений отношения амплитуд $U_{21}(\omega)$ на краях рекомендуемого равномерного участка АЧХ излучения, что отражается на неоправданно большом (по отношению к достигаемому улучшению сигнала $s_{ак}(t)$) увеличении амплитуды корректирующего сигнала возбуждения $u_2(t)$.

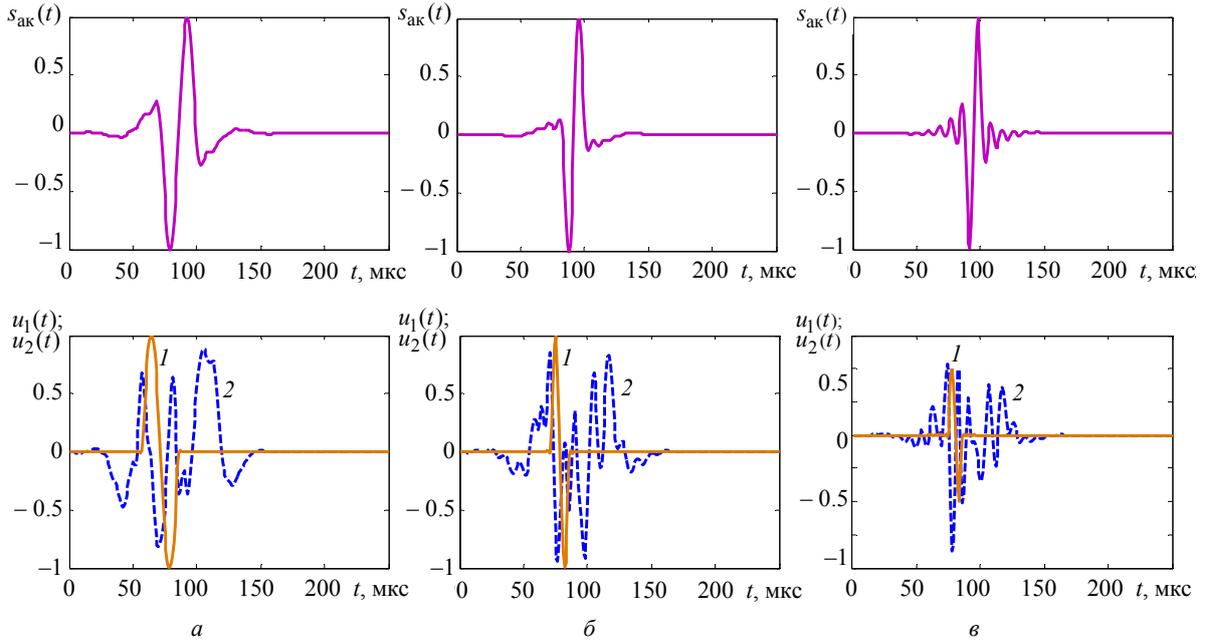


Рис. 6

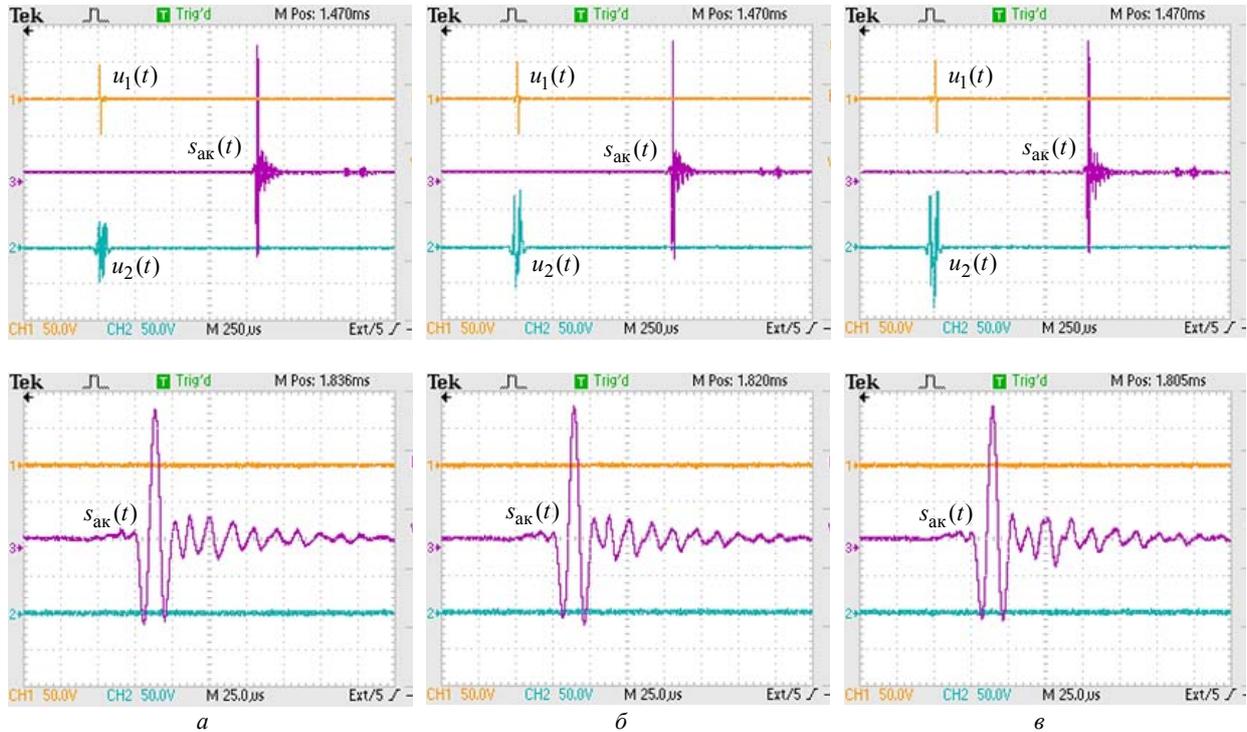


Рис. 7

Возможность управления ФЧХ излучения косвенно иллюстрируется также результатами измерений, представленными на рис. 7. Здесь для трех вариантов задания ФЧХ излучения для макета 1, подобно рис. 5, показан общий вид сигналов возбуждения $u_1(t)$, $u_2(t)$ и акустического сигнала $s_{ак}(t)$, который представлен с использованием двух масштабов развертки: 250 мкс/дел. и 25 мкс/дел. ФЧХ излучения была задана в следу-

ющих вариантах: $a - \varphi_V(\omega) = \psi$; $б - \varphi_V(\omega) = 0$; $в - \varphi_V(\omega) = -\psi$. Вид АЧХ излучения для этих вариантов был один и тот же. Возбуждение пьезостержней ПФВ осуществлялось в соответствии с решением задачи синтеза при использовании опорного однопериодного импульса $u_1(t)$ с частотой формирования $f = 70$ кГц. Сопоставление полученных результатов показывает, что структура акустических сигналов почти не изменяется

для разных вариантов задания ФЧХ излучения, за исключением так называемого «звона» – осциллирующих затухающих колебаний после основного сигнала. При этом опорный импульс возбуждения $u_1(t)$ остается одним и тем же, а корректирующий импульс возбуждения $u_2(t)$ существенно изменяется как по форме, так и по сдвигу по времени относительно $u_1(t)$. Эти и отмеченные ранее закономерности относятся ко всем исследованным макетам с ПФВ, возбуждаемым в соответствии с решением для них задачи синтеза.

В качестве сравнения эффективности предложенного способа возбуждения по отношению к синфазному или рассмотренным в [6], [7] можно отметить следующее. При синфазном возбуждении макетов 1 и 2 однопериодным импульсом с частотой формирования f_p и амплитудой A_0 той же, что и для сигнала $u_1(t)$, формируются акустические сигналы, содержащие 2.5–3 полупериода колебаний, максимальная амплитуда которых соответствует амплитуде акустических сигналов $s_{ак}(t)$, получаемых на частоте f_p при возбуждении ПФВ в соответствии с решением задачи синтеза. Если же для этих макетов (синфазно возбуждаемых на частоте f_p), у которых толщина

согласующих слоев близка к четвертьволновой ($a_{1v} \approx 0.5$), воспользоваться последовательностью трех однополярных компенсирующих полупериодных импульсов с амплитудами, соотносящимися как $A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 1.2 : 0.65$ [6], причем $A_0 = A_1$, то это позволяет сократить длительность акустического сигнала почти до 1 периода, но с амплитудой в 2.5–3 раза меньшей по сравнению с указанной для $s_{ак}(t)$ при возбуждении ПФВ в соответствии с решением задачи синтеза. Это уменьшение обусловлено тем, что в результате такой компенсации остаются два первых полупериода колебаний переходного процесса, определяемого сравнительно небольшой полосой пропускания ($\Delta f/f \approx 43\text{--}48\%$) макетов при их синфазном возбуждении. Перестройка по частоте акустических сигналов, получаемых для указанных двух вариантов синфазного возбуждения, практически невозможна. Так, при отходе от частоты f_p уже на $\pm 0.05f_p$ форма излучаемого акустического сигнала сильно искажается и затягивается. При формировании коротких акустических сигналов с помощью ПФВ, возбуждаемых в соответствии с решением задачи синтеза, амплитуда этих сигналов определяется заданным уровнем равномерного участка АЧХ излучения и сиг-

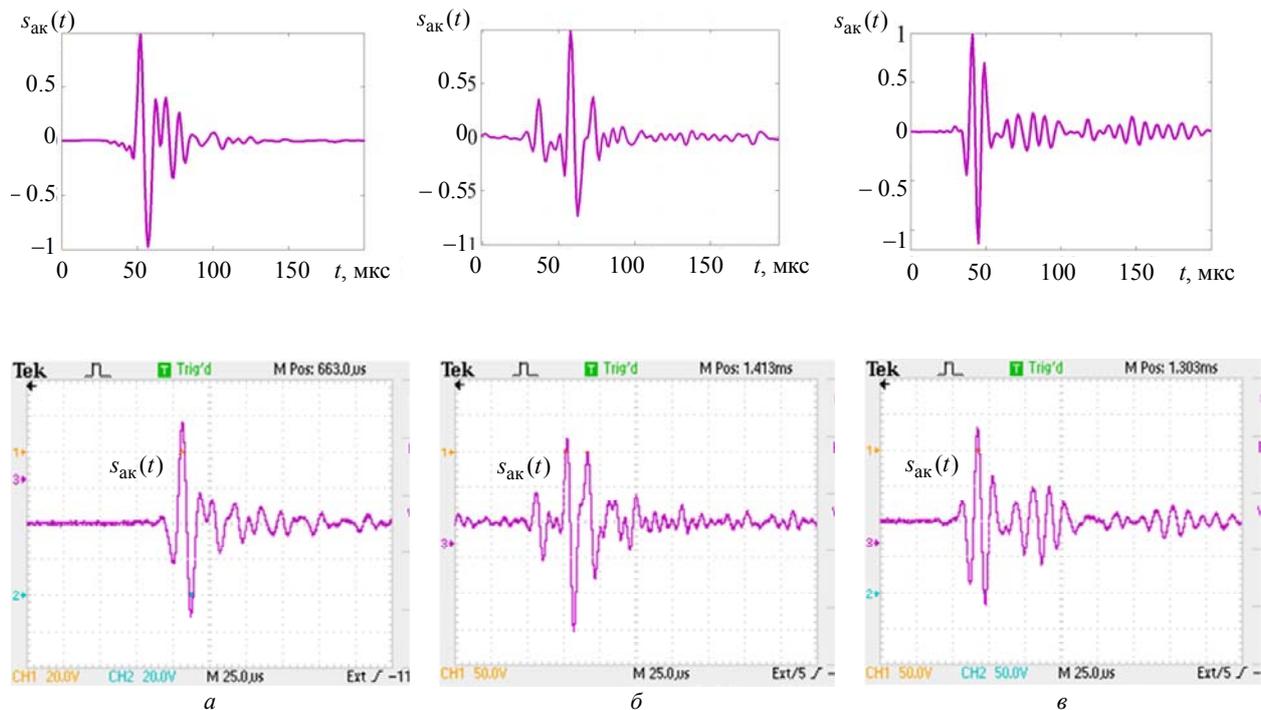


Рис. 8

нал $s_{ак}(t)$ как бы «вырезается» из монохромата.

Определенный интерес вызывает возможность излучения с помощью ПФВ возбуждаемых в соответствии с решением задачи синтеза, более сложных по форме акустических сигналов, например эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфинов [14]. Средняя частота спектра этих сигналов составляет 80...120 кГц, поэтому возможность излучения указанных сигналов демонстрируется с помощью макета 2 на рис. 8. Здесь верхний ряд соответствует нормированным по амплитуде оцифрованным реальным сигналам дельфинов (данные предоставлены Лабораторией морской биоакустики СПбГУ), а нижний ряд – результатам измерения и регистрации с помощью цифрового осциллографа *Tektronix* на флэш-накопитель USB акустических сигналов $s_{ак}(t)$, излученных макетом 2 (масштаб развертки 25 мкс/дел.). Видно, что излученные макетом 2 акустические сигналы вполне удовлетворительно отображают структуру исходных сигналов дельфинов.

Таким образом, для стержневых преобразователей с фазированным возбуждением двух частей

(секций) пьезостержня в соответствии с решением задачи синтеза экспериментально показана возможность получения эффективного излучения в диапазоне частот порядка двух октав. АЧХ излучения таких ПФВ формируется преимущественно в сторону высоких частот относительно полуволнового резонанса пьезостержня. Диапазон рабочих частот зависит от значения параметра p и может быть существенно увеличен, например при переходе от $p \approx 0.5$ к $p \approx 0.75$. Для ПФВ, возбуждаемых в соответствии с решением задачи синтеза, показана возможность излучения практически во всем их диапазоне рабочих частот перестраиваемых по частоте ультракоротких акустических импульсов, амплитуда которых определяется равномерным участком задаваемой (экспериментально реализуемой) АЧХ излучения. Рассматриваемые ПФВ позволяют излучать сигналы, подобные сигналам китообразных. Приведенные экспериментальные данные находятся в соответствии с выполненными расчетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charles H. S., John L. B. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. Ch. 2–4. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p.
2. Пьезокерамические преобразователи: справ. / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша и др.; под ред. С. И. Пугачева. Гл. 5–7. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / И. Н. Ермолов, М. Б. Гитис, М. В. Королев и др.; под общ. ред. И. Н. Ермолова. Гл. 1–6. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
4. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
5. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В. И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. С. 376–377, 599–601, 696–697.
6. Задириенко И. М., Кузьменко А. Г. Излучение коротких акустических импульсов стержневыми пьезокерамическими преобразователями при возбуждении электрическими сигналами сложной формы // *Акуст. журн.* 1984. Т. 30, № 3. С. 328–330.
7. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. К вопросу о возможности сокращения длительности акустического импульса преобразователя, возбуждаемого импульсами специальной формы // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2013. № 1. С. 74–81.
8. Акустические подводные низкочастотные излучатели / А. В. Римский-Корсаков, В. С. Ямщиков, В. И. Жулин, В. И. Рехтман. Л.: Судостроение, 1984. С. 166–167.
9. Моделирование источников зондирующих импульсов у дельфина: влияние критических параметров / Н. А. Дубровский, А. В. Гладилин, Б. Мель, М. Валберг // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50, № 4. С. 543–549.
10. Степанов Б. Г. Анализ и синтез частотных характеристик двухсекционных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением // *Тр. VIII Междунар. конф. ГА 2006 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб., 2006. С. 195–199.
11. Степанов Б. Г. О возможности управления частотными характеристиками и направленными свойствами стержневых преобразователей с помощью фазированного возбуждения их секций // *Акустика океана. Докл. XII науч. шк.-семинара им. акад. Л. М. Бреховских (XXI сессия РАО)*. Москва, 02-05.06.2009. М., 2009. С. 403–406.
12. Степанов Б. Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.
13. Степанов Б. Г. О влиянии конечности волнового размера излучающих накладок стержневого преобразователя с фазированным возбуждением секций на его частотные характеристики // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. № 6. С. 77–82.
14. 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.

B. G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

RADIATION OF SHORT ACOUSTIC SIGNALS BY ROD TRANSDUCERS WITH PHASED EXCITATION OF THEIR TWO PARTS

This article presents the results of experimental researches of models of antennas, composed of the rod transducers with amplitude and phase excitation of the two parts (sections) piezoelectric rod according to the decision of a problem of synthesis. The implementation of such an excitation is carried out using a software-controlled excitation system and allows to form a nearly uniform amplitude-frequency characteristic of radiation and almost linear phase-frequency characteristic of the radiation in the bandwidth of about 2 octaves. The possibility of radiations in this frequency band of ultrashort impulses reconstructed on frequency and also the ability to control the phase-frequency characteristic of the radiation are shown. The possibility of radiations signals similar to the signals of cetaceans, by using the excitation system and the rod transducers with amplitude and phase excitation, is considered. The comparative estimation of calculated and experimental data is given. The possibility of maintaining the required radiation characteristics when changing the parameters of the passive plates and the loading of the radiation apertures of the transducers (antennas) is noted.

Wideband transducer, synthesis of frequency characteristics, short acoustic signals
