

О построении и возбуждении широкополосных преобразователей волноводного типа

Г.С. Скуратов¹, Б.Г. Степанов²

¹ АО «Концерн «Океанприбор»
197136, г. Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46.
E-mail: glebskuratov96@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.
E-mail: bgstepanov@eti.ru

Рассмотрен способ возбуждения (задача анализа) преобразователя волноводного типа (ПВТ), обеспечивающий широкополосную амплитудно-частотную и линейную фазочастотную характеристики, что позволяет формировать короткие акустические импульсы. Обсуждается влияние на эти характеристики параметров ПВТ. Рассмотрены варианты построения антенн и собственно ПВТ, позволяющие почти в два раза уменьшить их массогабаритные параметры при сохранении эффективности излучения и полосы пропускания. Приведены результаты расчетов и некоторых экспериментальных исследований. Ключевые слова: преобразователь волноводного типа, амплитудно-фазовое возбуждение, полоса пропускания, короткий акустический импульс

On the construction and excitation of broadband waveguide type transducers

G.S. Skuratov¹, B.G. Stepanov²

¹ JSC «Concern «Oceanpribor»

² Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A method of excitation (an analysis task) of a waveguide type transducer (WTT) is considered, which provides broadband amplitude-frequency and linear phase-frequency characteristics, which makes it possible to generate short acoustic pulses. The influence of WTT parameters on these characteristics is discussed. Options for the construction of antennas and WTT proper are considered, which make it possible to reduce their weight and size parameters by almost half while maintaining radiation efficiency and bandwidth. The results of calculations and some experimental studies are presented. Keywords: waveguide type transducer, amplitude-phase excitation, bandwidth, short acoustic pulse

Введение

Для улучшения информативности, помехозащищенности и разрешающей способности гидроакустических систем все чаще используются широкополосные зондирующие сигналы [1]–[3]. Это предполагает наличие и дальнейшую разработку широкополосных преобразователей и антенн. Традиционно для расширения полосы пропускания используются акустические и электрические согласующие структуры, связанные моды колебаний, разночастотные преобразователи в составе антенны и др. [4]–[8]. Для ряда задач достаточно широкой полосы пропускания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователей. Однако для излучения сложных по структуре акустических сигналов, особенно для ультракоротких импульсов подобных эхолокационным сигналам китообразных [9], кроме широкополосной АЧХ нужна линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ), которая не в полной мере обеспечивается указанными способами расширения полосы пропускания.

Свойством линейности ФЧХ обладают преобразователи с амплитудно-фазовым возбуждением их частей согласно решению задачи синтеза, когда задаются равномерная АЧХ и линейная ФЧХ излучения, по которым и определяются условия возбуждения. В частности, к таким преобразователям, относятся широкополосные преобразователи волноводного типа (ПВТ) [10]–[12], которые представляют собой соосный набор N идентичных пьезоцилиндров с внутренним радиусом a и высотой l , разделенных по торцам акустически гибкими кольцевыми прокладками толщиной $\Delta \ll l$ ($d = l + \Delta$ – межцентровое расстояние) и возбуждаемых электрическими напряжениями $U_i = U_{im}(\omega)e^{j\psi_i(\omega)}$, определяемых из решения задачи синтеза. Здесь U_{im} и $\psi_i(\omega)$ – амплитуды и фазы электрических напряжений, в общем случае являющиеся функциями круговой частоты ω ; $i = 1, 2, \dots, N$. Внутренняя полость ПВТ заполняется жидкостью, контактирующей с внешней средой – водой. Излучение звуковых волн происходит через заполненные жидкостью отверстия (апертуры) крайних пьезоцилиндров 1 и N в двух направлениях: фронтальном и тыльном. Внешняя поверхность ПВТ не является излучающей, т. е. контактирует с газом, находящимся внутри корпуса ПВТ, или изолируется звукомягким экраном. При компоновке в антенне ПВТ располагаются в ее корпусе в виде параллельного набора [11]. Выходные отверстия ПВТ образуют апертуру антенны и формируют требуемую характеристику направленности (ХН).

Основные положения и результаты исследования базовой модели ПВТ

В данной работе рассмотрим возможности технически более простого, но достаточно эффективного варианта возбуждения пьезоцилиндров ПВТ, который обеспечивает широкополосную АЧХ и линейную ФЧХ излучения и основан на решении задачи анализа. При этом амплитуды и фазы электрических напряжений зададим в виде:

$$U_{im} = U_{Nm} \left[q + \frac{1-q}{N-1} (i-1) \right] \text{ и } \psi_i(\omega) = \omega\tau(i-1), \quad (1)$$

где $q = \frac{U_{1m}}{U_{Nm}}$; $\tau = d/c_0$;

c_0 – скорость звука в жидкости в ПВТ.

Амплитуды U_{im} не зависят от частоты и пропорционально увеличиваются с ростом номера i пьезоцилиндра. Характер колебаний внутренних поверхностей пьезоцилиндров ПВТ описывается системой из N уравнений [10], [11]:

$$\sum_{k=1}^N Z_{ik}^* v_k = N_T U_i, \quad (2)$$

где v_k – колебательная скорость внутренней поверхности k -го пьезоцилиндра;

$Z_{ii}^* = Z_{ii} + Z_i^{(\text{Пр})}$ при $i = k$; $Z_{ii}^* = Z_{ik}$ при $i \neq k$;

Z_{ii} и Z_{ik} , $Z_i^{(\text{Пр})}$ – соответственно собственное и взаимные сопротивления излучения, механический импеданс i -го пьезоцилиндра;

N_T – коэффициент электромеханической трансформации.

В [10]–[12] было показано, что рабочая область частот ПВТ составляет 3 октавы, когда в заполненной жидкостью полости ПВТ с волновыми размерами $k_0 a \approx 0.4 \dots 3.8$ ($k_0 = \omega/c_0$) распространяются квазиплоские волны. В этой области частот расчетные модели ПВТ (излучение в соосные волноводы [10] и в конусные полупространства с углом раскрытия $\theta = \pm \pi/4$ [12]) для выбранного варианта возбуждения дают близкие результаты. С учетом предполагаемой работы ПВТ в составе антенны и формирования ею более узкого угла раскрытия основного лепестка ХН, для анализа АЧХ и ФЧХ излучения ПВТ с принятым вариантом возбуждения и оценки влияния на эти характеристики параметров ПВТ, воспользуемся более простой моделью ПВТ, излучающего в соосные волноводы. В этом случае, выражения для импедансов, используемых в (2), подобно [10] можно представить в виде:

$$Z_{ii} = jz_0 S \left[\frac{J_0(x_0)}{J_1(x_0)} - \frac{4x_0}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(x_n l/2a) e^{jx_n l/2a}}{x_n^3} \right]; \quad Z_i^{(\text{Пр})} = R_{Si} \frac{(1-\eta)}{\eta} - jz_0 S Q \frac{n_{0\kappa}^2 x_0^2 - 1}{n_{0\kappa} x_0};$$

$$Z_{ik} = z_0 S \frac{4x_0}{l/a} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin^2(x_n l/2a) e^{jx_n |i-k|d/a}}{x_n^3}, \quad (3)$$

где $S = 2\pi a l$; $x_0 = k_0 a$;

$R_{Si} = \text{Re}(Z_{Si})$;

$Z_{Si} = \sum_{k=1}^N Z_{ik} v_k / v_i$ – полное сопротивление излучения i -го пьезоцилиндра;

$x_n = \sqrt{x_0^2 - \beta_n^2}$ при $x_0 > \beta_n$ и $x_n = j\sqrt{x_0^2 - \beta_n^2}$ при $x_0 < \beta_n$;

β_n – корни уравнения $J_1(\beta_n) = 0$;

$J_0(\dots)$ и $J_1(\dots)$ – цилиндрические функции Бесселя нулевого и первого порядка;

Q и η – механическая добротность и механоакустический КПД пьезоцилиндра;

z_0 – удельный импеданс жидкости, заполняющей ПВТ;

$n_{0\kappa} = c_0 / c_{\kappa}$;

c_{κ} – скорость звука в материале пьезоцилиндра.

С учетом принципа суперпозиции, выражения для звуковых давлений, излучаемых ПВТ во фронтальном (фр) и тыльном (т) направлениях, подобно [10], могут быть записаны в виде:

$$p^{(\text{фр,т})} = -2z_0 x_0 \sum_{i=1}^N v_i \sum_{n=0}^{\infty} \frac{J_0(\beta_n r/a) \sin(x_n l/2a)}{J_0(\beta_n) x_n^2} e^{\pm jk_n z_i^{(\text{фр,т})}/a}, \quad (4)$$

где $z_i^{(\text{фр})} = d(N-1) + l/2 + z_{\text{фл}} + z$; $z_i^{(\text{т})} = -[d(i-1) + l/2 + z_{\text{фл}} + z]$;

$z_{\text{фл}}$ – толщина фланца корпуса антенны;

z – координата, отсчитываемая от излучающих апертур ПВТ (ось ПВТ);

r – радиальная координата, отсчитываемая от оси ПВТ z .

Знаки «+» или «-» у показателя экспоненты в (4) соответствуют индексам «фр» или «т» в обозначениях $p^{(\text{фр,т})}$ и $z_i^{(\text{фр,т})}$, а величины v_i – определяются из (2).

Основное влияние на АЧХ звукового давления при данном возбуждении ПВТ оказывают значения его параметров N , q и $n_{0\kappa}$. Результаты расчетов АЧХ звукового давления представляются для условной дальней зоны ($z/a \geq 10$) на оси ПВТ ($r = 0$) в нормированном виде $p_{\text{норм}}^{(\text{фр,т})} = |p^{(\text{фр,т})}| / z_0 B$, полагая при этом коэффициент $B = N_{\text{т}} / z_0 S$, получающийся при решении системы (1), и U_{Nm} равными 1. ФЧХ излучения $\varphi^{(\text{фр,т})} = \arg[p^{(\text{фр,т})}]$ для удобства отображения определяется в пределах значений главных углов $[-\pi; \pi]$ в плоскостях излучающих апертур ПВТ ($z = 0$).

На рис. 1 показано влияние числа пьезоцилиндров N на АЧХ звукового давления во фронтальном (кривые 1–5) и тыльном (кривые 1'–5') направлениях, а также – на ФЧХ излучения во фронтальном направлении. Другими расчетными параметрами ПВТ были: $q = 0.3$; $l/a = 0.6$; $d/a = 0.66$; $Q = 3$; $n_{0\kappa} = 0.5$; $\eta = 0.7$. При $N \geq 5$ значение звукового давления во фронтальном направлении начинает стабилизироваться, особенно в центральной части АЧХ. В данном примере полоса пропускания для кривых 1–5 соответственно составляет: 0.45, 0.61, 0.89, 1.51 и 2.26 октавы. Для заданного числа пьезоцилиндров N полоса пропускания получается меньше, чем в случае возбуждения согласно решению задачи синтеза [10]–[12], но при этом обеспечивается в 1.5–1.8 раз больший уровень излучения при условии равенства максимальных амплитуд возбуждающих электрических напряжений. Что касается тыльного излучения, то оно существенно ниже фронтального в рабочей полосе частот ПВТ и это различие увеличивается с ростом N .

ФЧХ излучения для одиночного пьезоцилиндра (см. рис 1, б, кривая 1) обладает линейностью в сравнительно узкой полосе частот в области радиального резонанса

пьезоцилиндров ($k_0 a \approx 2$ для $n_{0к} = 0.5$), но, начиная с $N \geq 5$, ФЧХ излучения ПВТ становится практически линейной во всей рабочей полосе частот.

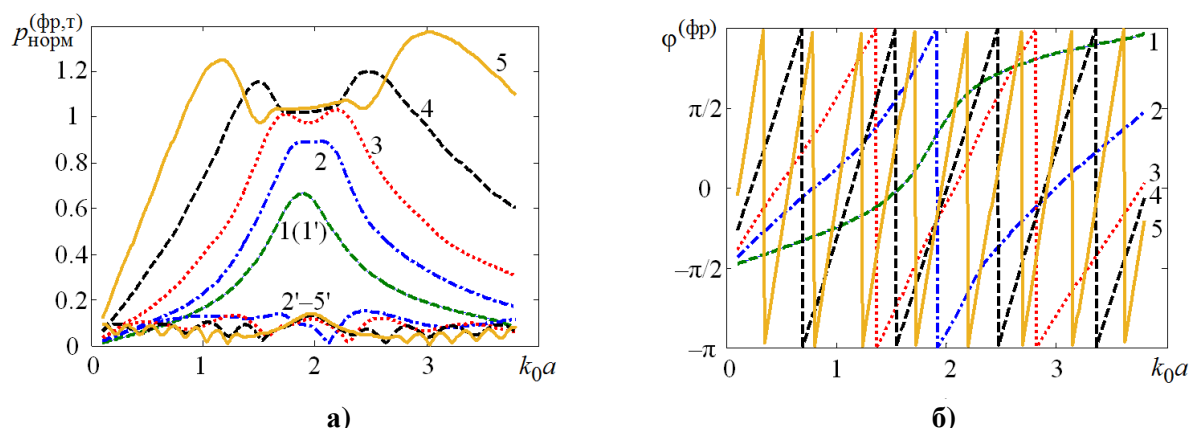


Рис. 1. Зависимость АЧХ (а) и ФЧХ (б) звукового давления ПВТ от числа N пьезоцилиндров:

1(1') – $N = 1$; 2(2') – $N = 3$; 3(3') – $N = 5$; 4(4') – $N = 10$; 5(5') – $N = 20$

При заданном числе N пьезоцилиндров ПВТ изменение величины l/a (d/a) влияет на АЧХ излучения подобно изменению N , но при фиксированных значениях l/a (d/a), поскольку и в том и другом случае происходит изменение суммарной длины ПВТ. При этом следует учитывать ограничение по $d/a \leq 0.82$ [10], связанное с возможным появлением добавочного максимума при излучении ПВТ в тыльном направлении. Например, при прочих равных условиях, АЧХ и ФЧХ излучения ПВТ практически совпадают для двух вариантов его построения: а) $N = 10$, $l/a = 0.6$, $d/a = 0.66$ и б) $N = 20$, $l/a = 0.3$, $d/a = 0.33$.

На рис. 2 в качестве примера приведены экспериментально полученные АЧХ чувствительности в режиме излучения $\gamma_{\text{изл}}$ [Па·м/В] для макета антенны (рис. 3), содержащего 12 ПВТ по $N = 10$ пьезоцилиндров состава ЦТС-19М с резонансной частотой $f_p = 44$ кГц и конструктивными параметрами $l/a = 0.54$; $d/a = 0.69$. Значение параметра $q = 0.3$. Полоса пропускания при излучении во фронтальном направлении составила 1.85 октавы и оказалась немного больше расчетной, что, по-видимому, связано с более явным проявлением радиального резонанса пьезоцилиндров

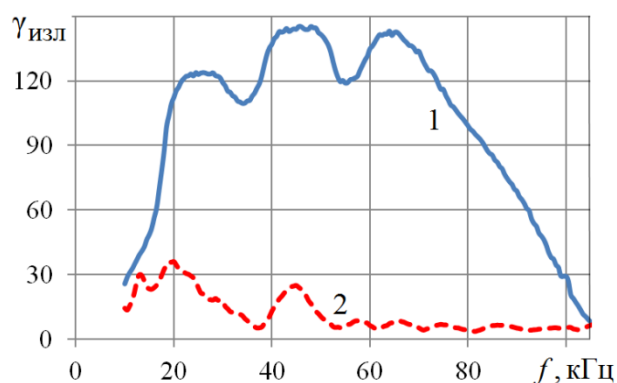


Рис. 2. АЧХ чувствительности макета антенны при излучении во фронтальном (1) и тыльном (2) направлениях

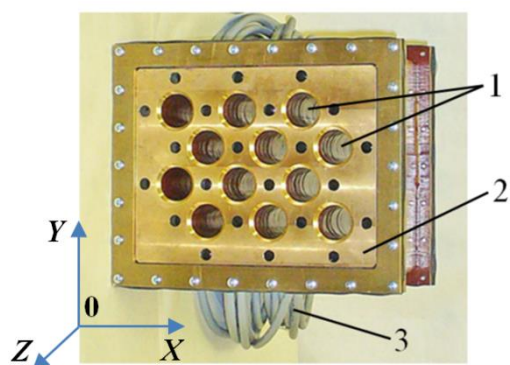


Рис. 3. Макет антенны: 1 – заполняемые водой полости ПВТ; 2 – корпус антенны; 3 – кабель

на АЧХ излучения. Компоновка ПБТ в макете антенны в виде рядов со сдвигом обусловлена внешним монтажом пьезоцилиндров в ПБТ и требованием к возможности сканирования ХН при работе в широком диапазоне частот [11].

Согласно расчетам, влияние параметра q в основном проявляется на виде АЧХ излучения ПБТ во фронтальном направлении с ростом числа пьезоцилиндров N . Например, для $N = 10$ неравномерность АЧХ превышает уровень -3 дБ при $q \geq 0.6$, а для $N = 20$ – уже при $q \geq 0.4$. Это происходит в основном за счет роста максимумов АЧХ излучения относительно ее центральной части. Что касается значения параметра $n_{0к}$, то его влияние отражается на смещении АЧХ излучения ПБТ во фронтальном направлении в сторону более высоких частот при $n_{0к} < 0.5$, и в сторону более низких частот при $n_{0к} > 0.5$. Это обстоятельство может быть использовано для построения ПБТ и антенн, составленных из них, с уменьшенными массогабаритными параметрами.

Отметим, что скорости звука в жидкостях, возможных для заполнения полости ПБТ, и современных составах пьезокерамики изменяется в достаточно широких пределах: $c_0 = 1300 - 1900$ м/с, а для $c_k = 2500 - 3700$ м/с – составы на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС-19, ЦТСНВ-1, ЦТБС-3, АРС-851, РРК-21 и др.) и $c_k = 4200 - 4500$ м/с – на основе титаната бария (ТБК-3, ЕС-31 и др.) [13]. Для сравнительно низкочастотных секционированных пьезоцилиндров с тангенциальной поляризацией на значение скорости звука c_k также может влиять использование чередующихся последовательностей пьезокерамических и пассивных трапециевидальных призм разной жесткости [14], [15]. При этом пьезоцилиндры могут быть выполнены из одного состава.

Варианты уменьшения продольных размеров антенн, составленных из ПБТ

С учетом применения пьезоцилиндров с разными значениями c_k (резонансными частотами $f_p \sim c_k/2\pi a$) возможны два варианта построения антенн и ПБТ с уменьшенными продольными размерами относительно рассмотренной выше базовой модели ПБТ. Первый вариант предполагает построение антенн из двух, расположенных параллельно друг другу, ПБТ1 и ПБТ2, каждый из которых содержит идентичные пьезоцилиндры, но отличающиеся друг от друга резонансными частотами f_{1p} и f_{2p} (скоростями звука $c_{1к}$ и $c_{2к}$). Принцип работы и условия возбуждения пьезоцилиндров в ПБТ1 и ПБТ2 аналогичны базовой модели ПБТ, а их полевые и нагрузочные характеристики описываются теми же формулами. В зависимости от требований к виду ХН возможны разные варианты компоновки излучающих апертур ПБТ1 и ПБТ2 в антенне. Например, исходя из компоновки ПБТ в антенне на рис. 3, верхний и нижний ряды по оси Y могут занять ПБТ1, а два ряда в середине – ПБТ2.

Согласно принципу суперпозиции АЧХ излучения антенны, составленной из разночастотных ПБТ1 и ПБТ2, представляет собой сумму их АЧХ с учетом амплитудно-фазовых соотношений и формируется двумя сдвинутыми относительно друг друга областями частот, которые могут быть объединены в одну общую полосу частот, подобно [6]–[8]. Однако звуковое давление формируемое антенной и ее ХН будут зависеть от конкретного расположения в ней апертур ПБТ1 и ПБТ2, а также от их количественного соотношения. Основываясь на характере распределения в апертурах ПБТ1 и ПБТ2 нормальных к ним z -компонент колебательных скоростей $v_{z1,z2}^{(ф,т)}$ и формуле Гюйгенса, для суммарного звукового давления, создаваемого плоской поверхностью S в дальней зоне во фронтальном (ф) и тыльном (т) направлениях, можно записать:

$$p_{\Sigma}^{(ф,т)} = -\frac{j\omega\rho_0}{2\pi r_0} e^{-j(\omega t - kr_0)} \int_S V_z^{(ф,т)}(\omega, S) e^{-jk(x \sin \theta \cos \psi + y \sin \theta \sin \psi)} dS, \quad (5)$$

где $V_z^{(\text{фр,т})}(\omega, S)$ – функция распределения в плоскости антенны z -компонент колебательных скоростей $v_{z1,z2}^{(\text{фр,т})} = \frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\partial p_{1,2}^{(\text{фр,т})}}{\partial z} \Big|_{z=0}$;

ρ_0 – плотность среды, в которую происходит излучение;

$p_1^{(\text{фр,т})}$ и $p_2^{(\text{фр,т})}$ – звуковые давления ПВТ1 и ПВТ2, определяемые согласно (3);

r_0 и θ, ψ – расстояние и углы сферической системы координат, центр которой совмещен с центром антенны.

Нормированная ХН антенны в ее рабочей полосе частот с учетом (5) будет:

$$R_{\Sigma}^{(\text{фр,т})}(\theta, \psi) = \left| p_{\Sigma}^{(\text{фр,т})}(\theta, \psi) / p_{\Sigma}^{(\text{фр,т})}(0, 0) \right|.$$

В зависимости от используемого пьезоэффекта (поперечный или продольный), значения колебательной скорости и звукового давления ПВТ будут пропорциональны коэффициентам $K_{\text{и}} = d_{31}/s_{11}^E$ или $K_{\text{и}} = d_{33}/s_{33}^E$, где d_{31}, d_{33} и s_{11}^E, s_{33}^E – пьезомодули и упругие податливости, которые отличаются для разных по составу пьезокерамик. Так согласно [13] для составов на основе цирконата свинца (ЦС) и титаната бария (ТБ) для указанных типов пьезоэффекта соотношение коэффициентов в среднем будет: $K_{\text{и}}^{(\text{ЦС})}/K_{\text{и}}^{(\text{ТБ})} \approx 1.4 - 1.9$. С целью выравнивания амплитуд колебательных скоростей на излучающих поверхностях пьезоцилиндров следует использовать обратную пропорцию в возбуждающих электрических напряжениях, подаваемых на пьезоцилиндры ПВТ1 и ПВТ2, по отношению к значениям для них $K_{1\text{и}}$ и $K_{2\text{и}}$. Осуществить это можно как конструктивно, используя разные межэлектродные расстояния, например, для секционированных пьезоцилиндров, так и электрически с помощью дополнительных усилителей возбуждающих напряжений.

На рис. 4 показан пример расчета АЧХ и ФЧХ звуковых давлений $p_{\Sigma}^{(\text{фр,т})}$, $p_1^{(\text{фр,т})}$ и $p_2^{(\text{фр,т})}$, определенных на оси антенны (см. рис. 3, пл. XOZ с указанным ранее примером расположения ПВТ1 и ПВТ2) и нормированных к частотно независимым множителям и общему числу ПВТ1 и ПВТ2 с параметрами: и $l/a = 0.6$; $d/a = 0.7$; $N_1 = N_2 = 5$; $q = 0.7$; $c_0 \approx 1500$ м/с; $c_{1\text{к}} \approx 2500$ м/с и $c_{2\text{к}} \approx 4500$ м/с. Ширина полосы пропускания составила 1.72 окт. Базовая модель ПВТ практически при тех же конструктивных параметрах, но с $N = 10$; $q = 0.3$ и $c_{\text{к}} \approx 3000$ м/с обеспечивает полосу пропускания 1.51

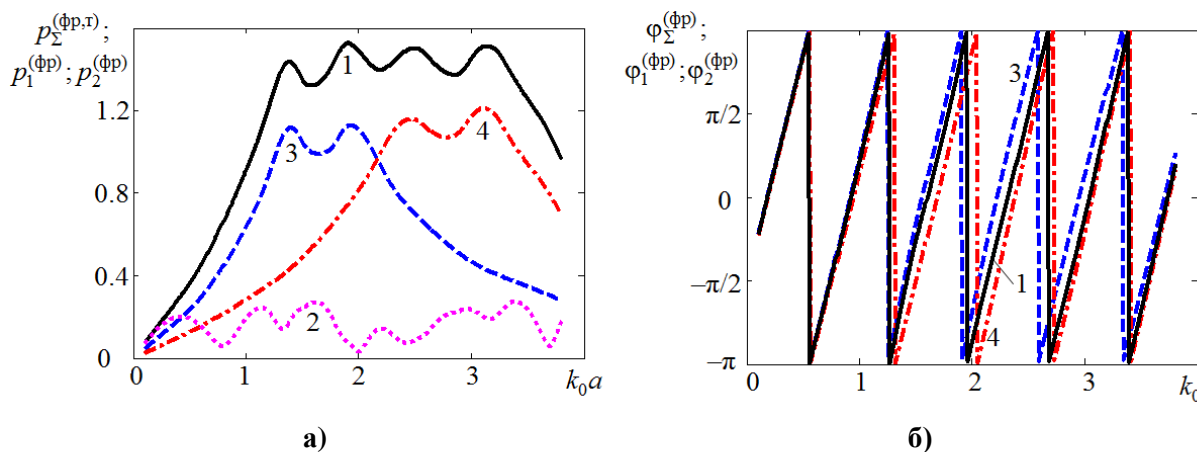


Рис. 4. АЧХ (а) и ФЧХ (б) суммарного звукового давления на оси антенны, составленной из ПВТ1 и ПВТ2: 1 и 2 – излучение во фронтальном и тыльном направлениях антенны; 3 и 4 – АЧХ и ФЧХ ПВТ1 и ПВТ2

октавы. В приведенном примере число ПВТ1 и ПВТ2 одинаковое, а также считается, что различие в значениях $K_{1н}$ и $K_{2н}$ скорректированы. В итоге полученный результат по виду АЧХ звукового давления и значению полосы пропускания соответствует сумме $|p_1^{(фр,т)} + p_2^{(фр,т)}|$. Если число ПВТ1 и ПВТ2 при проецировании на плоскость определения ХН не одинаковое или несимметричное, то возможны увеличение неравномерности суммарной АЧХ звукового давления или асимметрия ХН. Суммарная ФЧХ изучения антенны, составленной из ПВТ1 и ПВТ2, является практически линейной и, по сути, усредненной по их ФЧХ излучения (рис. 4, б).

Второй вариант базируется на модели составного ПВТ, показанной на рис. 5 [16]. Здесь пьезоцилиндры A и B высотой h_A и h_B разделены по торцам гибкими прокладками $\Delta \ll h_A, h_B$, имеют разные скорости звука (резонансные частоты) и объединены в пары $1, 2 \dots N$, которые возбуждаются подобно базовой модели ПВТ с образованием в заполненной жидкостью полости составного ПВТ бегущей волны. Усилители Y_A и Y_B каждой пары пьезоцилиндров служат для выравнивания (при необходимости) амплитуд колебательных скоростей $v_i^{(A,B)}$ на излучающих поверхностях пьезоцилиндров A и B .

Так как составной ПВТ по своей структуре состоит из двух, как бы «вложенных» друг в друга ПВТ(A) и ПВТ(B), то характер колебаний их пьезоцилиндров может быть определен с помощью формул (1)–(4). Однако, при расчете колебательных скоростей пьезоцилиндров $v_i^{(A)}$ и $v_i^{(B)}$ для каждого «вложенного» ПВТ(A) и ПВТ(B), а также сопротивлений излучения $Z_{Si}^{(A,B)} = \sum_{k=1}^N Z_{ik} v_k^{(A,B)} / v_i^{(A,B)}$, следует учитывать наличие дополнительных взаимных импедансов $Z_{iq}^{(ABз)}$ или $Z_{iq}^{(Bвз)}$, обусловленных работой пьезоцилиндров одного «вложенного» ПВТ по отношению к другому. При этом $Z_{iq}^{(ABз)}$ и $Z_{iq}^{(Bвз)}$ определяются подобно формуле (3) для Z_{ik} , но с учетом расположения и расстояний между пьезоцилиндрами каждого «вложенного» ПВТ(A) и ПВТ(B) по отношению к друг другу. Тогда полные сопротивления излучения для ПВТ(A) и ПВТ(B) можно представить в виде: $Z_{Si}^{(AB)} = Z_{Si}^{(A)} + \sum_{q=1}^N Z_{iq}^{(Bвз)} v_q^{(B)} / v_i^{(A)}$ и $Z_{Si}^{(BA)} = Z_{Si}^{(B)} + \sum_{q=1}^N Z_{iq}^{(ABз)} v_q^{(A)} / v_i^{(B)}$. Причем здесь $Z_{iq}^{(ABз)}$ и $Z_{iq}^{(Bвз)}$ при $q = i$ соответствуют дополнительному взаимному импедансу, обусловленному работой i -го пьезоцилиндра ПВТ(A) или ПВТ(B) синфазно возбуждаемого с i -м пьезоцилиндром ПВТ(B) или ПВТ(A), находящимися в одной паре.

Звуковое давление составного ПВТ, формируемое в его фронтальной и тыльной апертурах, согласно принципу суперпозиции можно записать: $p_{\Sigma\text{сост}}^{(фр,т)} = p_A^{(фр,т)} + p_B^{(фр,т)}$, здесь $p_A^{(фр,т)}$ и $p_B^{(фр,т)}$ – звуковые давления, формируемые ПВТ(A) и ПВТ(B), которые определяются подобно (4). Однако при расчете этих звуковых давлений следует учесть дополнительную разность хода для волн, излучаемых «вложенными» ПВТ(A) и ПВТ(B) до апертур составного ПВТ, соответственно: во фронтальном (ПВТ(A) через пьезоцилиндр B , см. рис. 5) и тыльном (ПВТ(B) через пьезоцилиндр A) направлениях. При компоновке в антенне составных ПВТ все их апертуры будут одинаковыми подобно использованию базовой модели ПВТ.

На рис. 6 приведены АЧХ суммарного звукового давления $p_{\Sigma\text{сост}}^{(фр)}$, а также – звуковых давлений $p_A^{(фр)}$ и $p_B^{(фр)}$ «вложенных» ПВТ(A) и ПВТ(B) определенных на оси антенны, содержащей составные ПВТ, и нормированных к частотно независимым множителям. Параметры, принятые при расчете: число пар пьезоцилиндров, $d/a = 0.78$; $N_1 = N_2 = 5$; $q = 0.7$; $h_A/a = h_B/a = 0.34$; $c_0 \approx 1500$ м/с; $c_A = 4500$ м/с и $c_B = 2500$ м/с. Ширина полосы пропускания в данном примере составила 1.51 октавы.

В приведенном примере считается, что различие в составах пьезоцилиндров (их колебательных скоростей $v_i^{(A)}$ и $v_i^{(B)}$) скорректировано с помощью усилителей Y_A и Y_B . Суммарная ФЧХ излучения, подобно рис. 4, б, является практически линейной и как бы усредненной по ФЧХ «вложенных» ПВТ(А) и ПВТ(В).

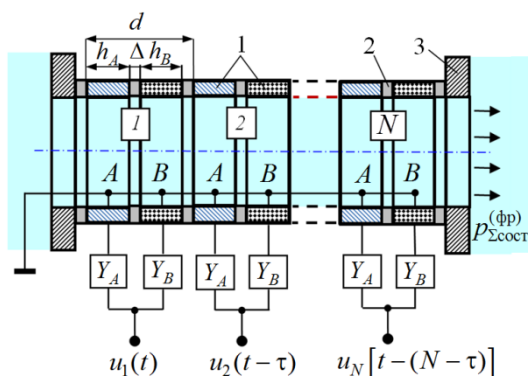


Рис. 5. Модель составного преобразователя волноводного типа: 1 – пьезоцилиндры A и B с разными скоростями звука; 2 – акустически гибкие прокладки; 3 – фланец корпуса антенны

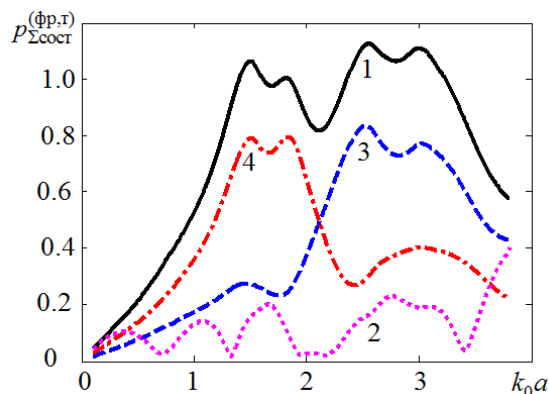


Рис. 6. АЧХ звукового давления на оси антенны, содержащей составные ПВТ: 1 и 2 – излучение во фронтальном и тыльном направлениях антенны; 3 и 4 – АЧХ ПВТ(А) и ПВТ(В)

Уменьшение высоты пьезоцилиндров в составном ПВТ, а также наличие и влияние дополнительных взаимных импедансов $Z_{iq}^{(\text{вз})}$ отражается на увеличении как активной, так и реактивной компонент сопротивлений излучения пьезоцилиндров для ПВТ(А) и ПВТ(В). В итоге это сказывается на небольшом уменьшении полосы пропускания и уровня излучения по сравнению с предыдущим вариантом.

Рассмотрим импульсный режим работы исследуемых ПВТ и антенн составленных из них, используя преобразование Фурье. Тогда, подобно [11], для излученных акустических импульсов и импульсов возбуждения можно записать:

$$s_{\text{ак}}(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_{\text{в}}} \Phi(\omega) p_{**}^{(\text{фр}, \tau)}(\omega) e^{j\omega t} d\omega; \quad u_i(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_{\text{в}}} \Phi(\omega) U_i(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Здесь: $\Phi(\omega)$ – спектральная характеристика импульса, который требуется излучить; $\omega_{\text{в}}$ – верхний предел интегрирования, определяемый по уровню $\Phi_{\text{min}}(\omega)/\Phi_{\text{max}}(\omega) \leq 0.1$; $p_{**}^{(\text{фр}, \tau)}$ – звуковые давления, получающиеся при излучении антенн, составленных из базовых ПВТ ($p^{(\text{фр}, \tau)}$), разночастотных ПВТ ($p_{\Sigma}^{(\text{фр}, \tau)}$) и составных ПВТ ($p_{\Sigma \text{сост}}^{(\text{фр}, \tau)}$). С учетом используемого закона возбуждения пьезоцилиндров электрические импульсы $u_i(t)$ представляют собой те сигналы, которые требуется излучить, но сдвинутые друг относительно друга на время τ и увеличивающиеся по амплитуде с ростом номера i согласно формуле (1) для $U_{\text{им}}$.

На рис. 7 приведены расчетные $s_{\text{ак}}(t)$ и экспериментальные $s_{\text{ак}}^{(\text{экс})}(t)$ акустические импульсы, излученные макетом антенны из 12 ПВТ (рис. 3) во фронтальном направлении при возбуждении пьезоцилиндров однопериодными импульсами $u_i(t)$ с разной частотой их формирования $f_{\text{имп}}$, развертка по времени 50 мкс/дел. Расчетные акустические импульсы нормированы к максимальному значению своего полупериода.

На рис. 8 показаны результаты расчетов нормированных к максимальному полупериоду акустических импульсов $s_{\text{ак}}(t)$, определенных на оси антенн составленных из базовых ПВТ ($N = 10$), разночастотных ПВТ ($N_1 = N_2 = 5$) и составных ПВТ ($N_A =$

$N_B = 5$) с указанными ранее параметрами и имеющими близкие значения полосы пропускания. Возбуждающими сигналами $u_i(t)$ были однопериодные импульсы (кривая 1) с частотой формирования $k_0 a = 2$. Шкала по времени на рис. 8 нормирована к полупериоду колебаний T_0 на частоте формирования импульса. Формы импульсов, излучённых различными антеннами, достаточно близки (особенно кривые 2 и 3), что подтверждает возможность использования рассмотренных вариантов построения ПВТ и антенн, составленных из разночастотных и составных ПВТ, и тем самым позволяет практически в два раза уменьшить массогабаритные параметры этих антенн.

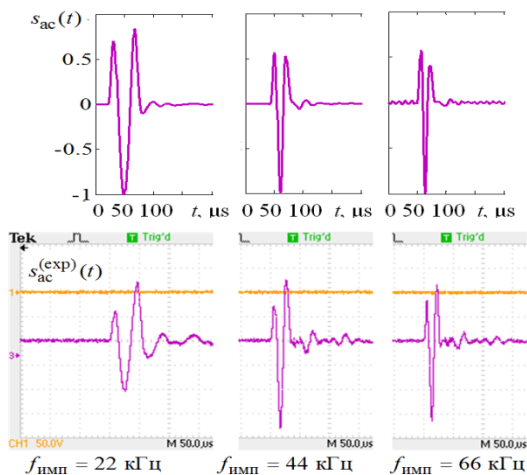


Рис. 7. Вид акустических импульсов, излученных макетом антенны из базовых ПВТ

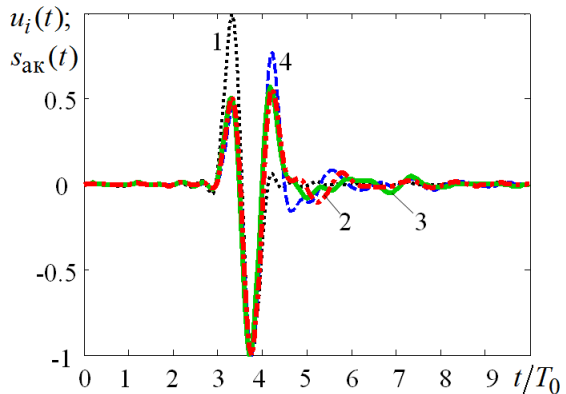


Рис. 8 Вид импульса возбуждения (1) и акустических импульсов, излученных антеннами из: базовых ПВТ (2), разночастотных ПВТ (3) и составных ПВТ (4)

Выводы

Рассмотренный вариант возбуждения ПВТ достаточно прост в реализации и позволяет в зависимости от числа пьезоцилиндров обеспечить полосу пропускания порядка 1.5–2 октав с практически линейной ФЧХ излучения. Показана возможность уменьшения почти в два раза массогабаритных параметров антенн, составленных из ПВТ, путем уменьшения продольных размеров ПВТ по сравнению с их базовой моделью при сохранении эффективности излучения и полосы пропускания. Несмотря на отмеченные плюсы и минусы оба рассмотренные решения, благодаря практически линейной ФЧХ излучения, позволяют излучать структурно сложные акустические сигналы, в том числе – перестраиваемые по частоте короткие импульсы.

Литература

1. Черниковская Г.Л. Особенности применения сложных сверхширокополосных сигналов в гидроакустике // Материалы V Всероссийской научной конференции Муром, 26–28 июня 2012 г. С. 371-376.
2. Sknarya A.V., Razin A.A., Toshchov S.A., Demidov A.I. Ultra wideband sounding signals in hydroacoustic systems // RENSIT. 2018. Vol.10, i. 2. P. 209-212.
3. Кебкал К.Г. Численное моделирование скрывающих свойств гидроакустических сигналов связи с линейной разверткой несущей // Подводные исследования и робототехника. 2020. Т. 32, № 2. С. 4-12.
4. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В.И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. С. 696-697 (787 с).

5. Пат. USA 8072843 B1 МПК H04R 17/00. Stepped multiply resonant wideband transducer apparatus / John L. Butler, Alexander L. Butler. Оpubл. 18.03.2009.
6. Патент US 6722003 Underwater broadband electroacoustic transducer / Dunn Sheng-Dong, Yeh Chi-Zen, Jih Jeng-Yow. Оpubл. 20.04.2004.
7. Патент US 2003/0055337 A1 Dual-frequency ultrasonic array transducer and method of harmonic imaging / Gregory Sharat Lin. Оpubл. 20.03.2002.
8. Качанов В.К., Соколов И.В., Синицын А.А. и др. Разработка УЗ широкополосного мозаичного низкочастотного пьезопреобразователя с ограниченной апертурой // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 26-32.
9. Иванов М.П., Родионов А.А., Стефанов В.Е. Возможности сверхширокополосных систем наблюдения на примере исследования природного сонара зубатых китов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 100-120.
10. Степанов Б.Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 87-96.
11. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 60-70.
12. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Обобщенная модель преобразователя волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 2. С. 35-45.
13. Справочник пьезокерамических материалов различных фирм. URL: https://elpapiezo.ru/Catalogs/catalog_materials_company_countries.pdf (Дата обращения 25.02.2026).
14. Бушер М.К. Динамические особенности пьезокерамических преобразователей на основе колец неоднородной структуры // Акуст. журн. 1986. Т. 32, № 2. С. 145-151.
15. Махов В.И., Филимонова Е.А. Широкополосный измерительный цилиндрический излучатель // Тр. Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С.150-153.
16. Патент RU 228160 Гидроакустический преобразователь волноводного типа / Степанов Б.Г. Оpubл. 16.08.2024, Бюл. № 23.