

Некоторые аспекты формирования коротких акустических импульсов широкополосными системами с амплитудно-фазовым возбуждением

И.С. Пестерев¹, Б.Г. Степанов²

¹ ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор» 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30.

E-mail: ivanpesterev@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина) 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

E-mail: bgstepanov@etu.ru

Рассматривается импульсный режим работы сверхширокополосных систем, содержащих пьезопреобразователи с амплитудно-фазовым возбуждением. Обсуждается влияние на структуру акустических импульсов изменения частоты их формирования, длительности, вида задаваемых амплитудно- и фазочастотных характеристик излучения, а также – расширения волнового фронта, связанного с конечностью апертуры антенн и рассмотрением импульсов в дальней зоне. Приводятся некоторые результаты расчетов и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: короткий акустический импульс, сверхширокополосный преобразователь, амплитудно-фазовое возбуждение, перестройка по частоте, форма импульса.

Some aspects of the formation of short acoustic pulses by wideband systems with amplitude-phase excitation

I.S. Pesterev¹, B.G. Stepanov²

¹ State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC

² Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

The pulsed mode of operation of ultra-wideband systems containing piezoelectric transducers with amplitude-phase excitation is considered. The influence on the structure of acoustic pulses of changes in the frequency of their formation, duration, type of the specified amplitude and phase-frequency characteristics of radiation, as well as the expansion of the wavefront associated with the finiteness of the antenna aperture and the consideration of pulses in the far zone is discussed. Some results of calculations and experimental studies are given.

Keywords: short acoustic pulse, ultra-wideband transducer, amplitude-phase excitation, frequency tuning, pulse shape.

Введение

Освоение ресурсов Мирового океана и защита водных рубежей страны связаны с необходимостью создания новых, более совершенных гидроакустических систем (ГАС) различного назначения. Во многом эти задачи сопряжены с разработкой новых принципов построения и функциональности гидроакустических преобразователей и антенн, а также – систем их возбуждения. В последнее время для улучшения информативности, помехозащищенности и разрешающей способности ГАС в качестве зондирующих используются сверхширокополосные сигналы [1], такие как частотно модулированные, хаотические сигналы, кодовые последовательности, ультракороткие импульсы и др. [2]–[5]. Возможность их применения предполагает разработку сверхширокополосных преобразователей и антенн. Причем, если для частотно модулированных сигналов (сравнительно длинных радиоимпульсов) базовым параметром является ширина полосы пропускания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователей, то для более сложных по структуре сигналов, особенно для ультракоротких импульсов, определяющим фактором их неискаженного формирования служит линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ) преобразователей. Технические решения для широкополосных преобразователей (здесь очень обширная библиография, в частности [6]), особенно основанные на использовании связанных мод колебаний, согласующих структур и корректирующих электрических цепей, не в полной мере обеспечивают свойство линейности ФЧХ в своей полосе пропускания. Указанным свойством обладают преобразователи с амплитудно-фазовым возбуждением (ПАФВ) их частей (секций) согласно решению задачи синтеза [7]–[14], когда задаются равномерная АЧХ и линейная ФЧХ излучения, в соответствии с которыми и определяются условия возбуждения. В частности, стержневые и пластинчатые ПАФВ [7]–[10] обеспечивают полосу пропускания до 2–2.5 октав, а ПАФВ волноводного типа [12]–[14] – до 3–3.3 октавы.

Основные положения и обсуждение результатов исследования

Колебательный процесс преобразователя описывается его частотной характеристикой, которая служит передаточной функцией в режиме излучения между электрическим сигналом возбуждения и излученным акустическим сигналом. Акустический сигнал, формируемый преобразователем как излучателем, может быть определен с использованием преобразования Фурье:

$$s_{\text{ак}}^*(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)\Phi(\omega)e^{j\omega t} d\omega,$$

где $\Phi(\omega)$ – спектральная функция сигнала $s(t)$, который требуется излучить;

$F(\omega) = F_m(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ – комплексная передаточная функция преобразователя;

$F_m(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ – АЧХ и ФЧХ излучения.

Согласно задаче синтеза, $F_m(\omega) = \text{const}$ в заданном диапазоне частот, а $\varphi(\omega)$ – линейная функция [7], [9], [12]. При этом излученный акустический сигнал $s_{\text{ак}}(t)$ и импульсы возбуждения частей (секций) ПАФВ $u_i(t)$, ввиду симметрии спектральной функции, с точностью до постоянного множителя могут быть определены по формулам:

$$s_{\text{ак}}(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_{\text{в}}} F(\omega)\Phi(\omega)e^{j\omega t} d\omega; \quad u_i(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_{\text{в}}} U_i(\omega)\Phi(\omega)e^{j\omega t} d\omega, \quad (1)$$

где $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\Phi_i(\omega)}$ – частотные зависимости комплексных напряжений возбуждения i -тых частей (секций) ПАФВ, найденные из решения задачи синтеза;

$U_{im}(\omega)$ и $\Phi_i(\omega)$ – амплитуда и фаза;

ω_B – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектральных составляющих в функции $\Phi(\omega)$, например, по уровню $\Phi_{min}(\omega)/\Phi_{max}(\omega) \leq 0.1$.

Важность линейности ФЧХ излучения для формирования коротких импульсных сигналов проиллюстрируем на примере задания трех вариантов АЧХ и ФЧХ излучения, которые графически показаны на рис. 1 (а) и (г). Вначале рассмотрим вариант задания равномерной АЧХ излучения $F_m(\omega) = \text{const}$ в достаточно широкой, но ограниченной полосе частот ($\omega/\omega_0 \approx 0.5 \dots 3$, порядка 2.6 октавы; ω_0 – частота нормировки), и линейной ФЧХ излучения, определяемой, например, как $\varphi(\omega) = \omega$. Примером реализации таких АЧХ и ФЧХ излучения могут служить ПАФВ, возбуждаемые согласно решению задачи синтеза [7]–[14].

Рассмотрим возможность получения акустического однопериодного импульса $s_{ак}(t)$ с использованием (1), с частотой формирования $\omega_{им} \approx 1.8\omega_0$, соответствующей средней частоте указанной полосы. Спектральная функция такого импульса при $q = 1$ определяется выражением:

$$\Phi(\omega) = \frac{j2A_{им}}{\omega_{им}} \frac{\sin \omega \tau_{им} q}{1 - (\omega/\omega_{им})^2} \cdot \exp[-j\omega \tau_{им} q], \quad (2)$$

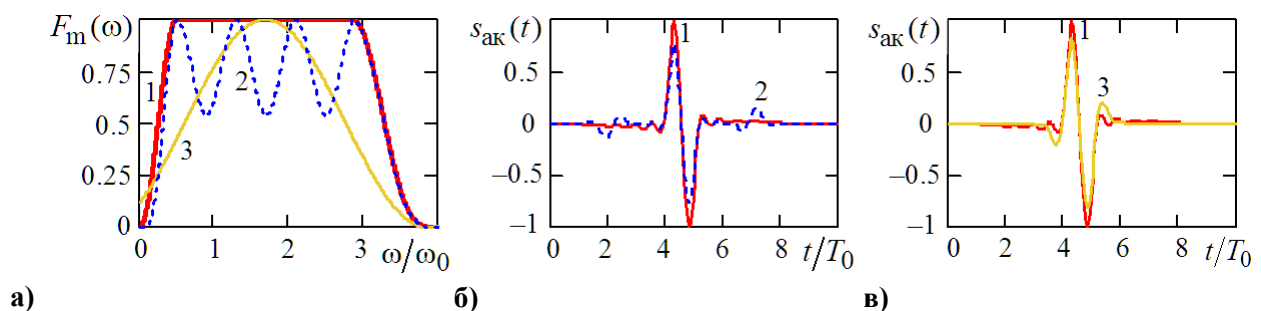
где $A_{им}$ – амплитуда;

q – число периодов с частотой $\omega_{им} = 2\pi f_{им}$;

$\tau_{им} = 1/2f_{им}$;

$q = 1; 2, \dots$

Для варианта с равномерной АЧХ и линейной ФЧХ излучения (кривые 1, рис. 1 (а) и (г)) в этом случае формируется практически однопериодный акустический импульс (см. кривые 1, рис. 1 (б), (в), (д) и (е)). Здесь $T_0 = \pi/\omega_0$ – длительность полупериода на частоте нормировки ω_0 . При $\omega_{им} \approx 1.8\omega_0$ область основного максимума спектральной функции рассматриваемого импульса расположена в пределах задаваемой АЧХ излучения, а ее сравнительно небольшая часть, соответствующая дополнительным максимумам, находится за пределами этой АЧХ. Это приводит к появлению слабых осцилляций в начале и в конце акустического импульса. Уменьшение частоты формирования $\omega_{им}$ однопериодного импульса, которое приводит к смещению спектральной функции в область более низких частот, или расширение равномерного участка АЧХ излучения – способствует уменьшению указанных осцилляций.



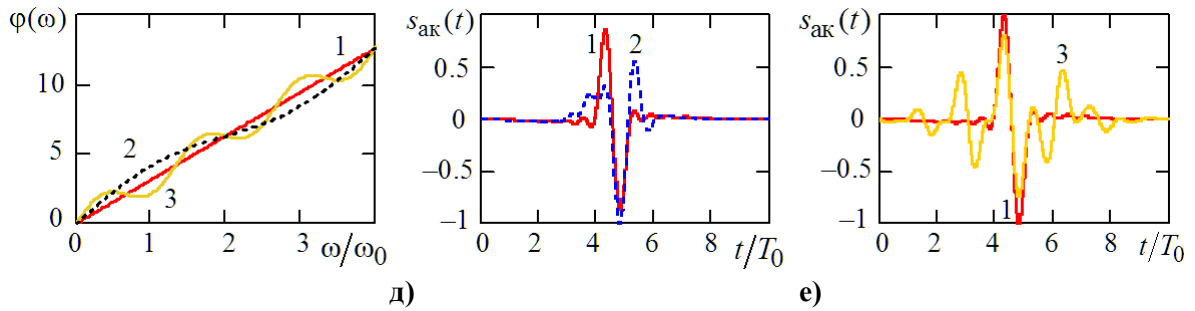


Рис. 1. АЧХ и ФЧХ излучения (а, г), акустические импульсы (б, в, д, е).
 1 – равномерная АЧХ и линейная ФЧХ; 2 и 3 – варианты изменения АЧХ и ФЧХ

При увеличении неравномерности АЧХ излучения в той же области частот вплоть до -6 дБ (рис. 1 (а), кривая 2) и при сохранении линейности ФЧХ излучения ($\phi(\omega) = \omega$), формирование акустического импульса сопровождается небольшим уменьшением амплитуды его основных полупериодов и увеличением амплитуд его дополнительных полупериодов (рис. 1 (б), кривая 2). В случае использования колоколообразной АЧХ излучения (рис. 1 (а), кривая 3), имеющей меньшую полосу пропускания (порядка 1.5 октавы) и почти совпадающую с областью основного максимума спектральной функции, при условии линейной ФЧХ излучения, форма акустического импульса также в целом сохраняется, но дополнительные колебания локализуются вблизи основного импульса (рис. 1 (в), кривая 3).

Сравнительно небольшие отклонения фазы (в пределах $\pm\pi/4$) от линейного хода ФЧХ излучения (рис. 1 (г), кривые 2 и 3), при постоянстве АЧХ излучения (рис. 1 (а), кривая 1), приводит к заметным искажениям акустических импульсов (рис. 1 (д) и (е), кривые 2 и 3). Указанные закономерности сохраняются и для других значений несущей частоты ω_0 в пределах равномерного участка АЧХ излучения. Изменение линейного вида ФЧХ излучения, например: $\phi(\omega) = \pm\omega$; $\phi(\omega) = \pm(\omega_0 - \omega)$ и т. д., для рассмотренных АЧХ излучения практически не сказывается на форме излучаемых акустических импульсов, но отражается на некотором их смещении по временной оси. Однако если использовать другие, отличные от принятого (рис. 1 (г), кривая 1), варианты задания линейного хода ФЧХ излучения с рассмотренным дополнительным отклонением фазы и при условии постоянства АЧХ излучения, то это приведет к еще большим искажениям излучаемого акустического импульса.

Для волноводных ПАФВ линейность ФЧХ излучения $\phi(\omega)$ предопределяется способом его возбуждения, обеспечивающего режим бегущей волны [12]–[14]. ФЧХ излучения $\phi(\omega)$ двухсекционных стержневых и пластинчатых ПАФВ задается при решении для них задачи синтеза и влияет на вид частотной зависимости отношения амплитуд и разности фаз возбуждающих секции ($i = 1; 2$) электрических напряжений [7]–[10]. Непосредственное измерение ФЧХ излучения в диапазоне частот порядка 2 октав является достаточно сложной задачей, поэтому возможность управления задаваемой ФЧХ излучения для этих ПАФВ может быть продемонстрирована через их импульсные характеристики, определяемые согласно (1) и реализуемые с использованием разработанных макетов [8], [13] и схемы возбуждения [11].

В качестве примера, на рис. 2 в двух масштабах (1:1 и 10:1) показаны акустические сигналы $s_{ак}(t)$ макета антенны из 5×6 двухсекционных стержневых ПАФВ, равные по длине секции которых возбуждаются электрическими импульсами $u_1(t)$ и $u_2(t)$, полученными при условии выбора $U_1(\omega) = \text{const}$ в качестве опорного [7]–[10], когда вид сигнала $u_1(t)$ соответствует виду заданного сигнала $s(t)$, которым в данном случае служит однопериодный импульс. Заданная частота формирования импульса $f_{им} = 70$ кГц, что соответствует значению $\omega_{им} \approx 1.8\omega_0$. Как видно, задание разных линейных ФЧХ излучения практически не отражается на виде акустических сигналов $s_{ак}(t)$, опорный импульс возбуждения $u_1(t)$ также остается неизменным, а

корректирующий импульс возбуждения $u_2(t)$ существенно изменяется как по форме, так и по сдвигу по времени относительно $u_1(t)$.

Экспериментальные исследования АЧХ и импульсных характеристик ряда макетов стержневых ПАФВ в целом подтвердили данные расчетов по достижению полосы пропускания порядка 2 октав и возможности формирования перестраиваемых по частоте ультракоротких акустических импульсов [8]. Однако вид указанных импульсов и фактические значения частот их формирования ω_Φ не полностью соответствуют задаваемым параметрам в рамках рассматриваемой расчетной модели, использующей приближение плоских волн. В частности, как следует из рис. 2, при планировании излучения однопериодного акустического импульса макетом антенны, составленной из стержневых ПАФВ, как правило, формируется акустический импульс, содержащий дополнительный полупериод. Для реальной акустической системы (антенны) на формируемый ею сигнал влияет как соотношение частотных характеристик полосы пропускания ПАФВ и ширины спектра сигнала, так и изменение направленных свойств конечной апертуры антенны и связанное с этим расхождение волнового фронта.

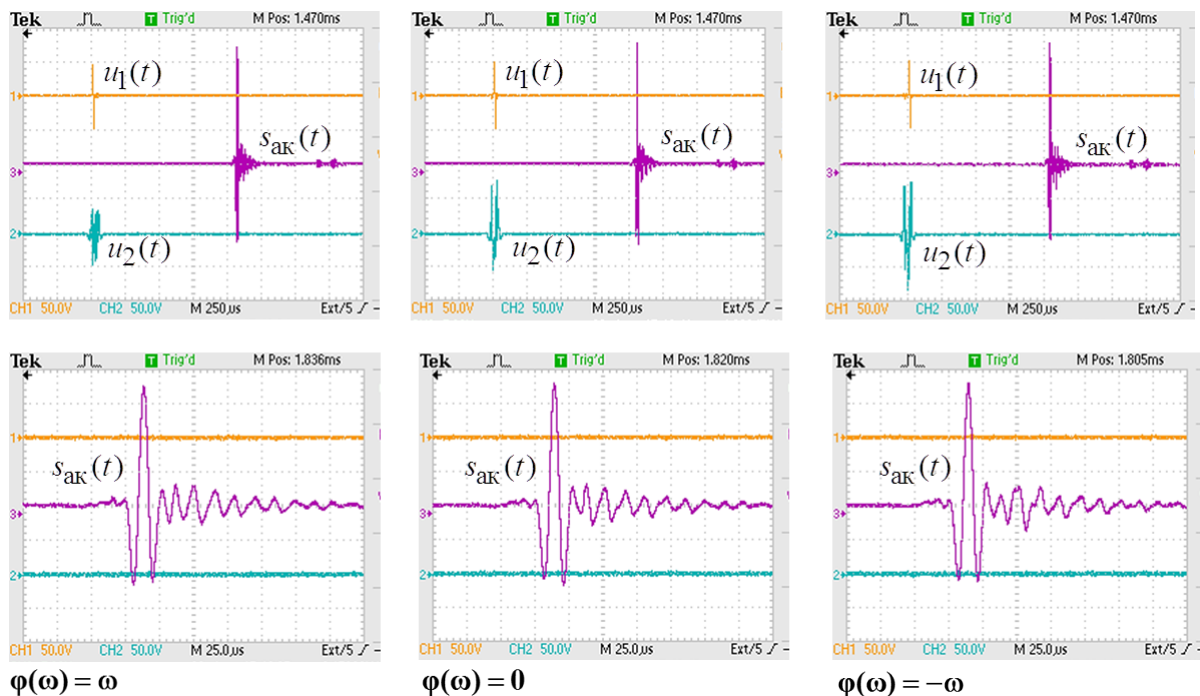


Рис. 2. Влияние задаваемой ФЧХ излучения $\varphi(\omega)$ на вид импульсов возбуждения и акустического импульса для макета антенны с 5×6 стержневых ПАФВ.

Для оценки указанного влияния воспользуемся формулой Гюйгенса для звукового давления, создаваемого плоской ограниченной поверхностью S , расположенной в жестком экране:

$$p = -\frac{j\omega\rho}{2\pi} \int_S \frac{v_n(S)e^{-j(\omega t - kr)}}{r} dS, \quad (3)$$

где $v_n(S)$ – распределение нормальной компоненты колебательной скорости по поверхности S ;

$$k = \omega/c;$$

ρ и c – плотность и скорость звука воды;

r – расстояние от поверхности S до точки наблюдения.

Для плоской дискретной антенны, содержащей $n \times m$ идентичных стержневых ПАФВ с излучающей поверхностью $a \times b$ и дискретом соответственно d_1 и d_2 , полагая независимость $v_n(S)$ от координат поверхности S , т.е. $v_n(S) = N_0 F(\omega)$, с учетом (3), при условии работы в дальней зоне, может быть получено следующее выражение:

$$p = p_s(\omega, \theta, \psi) = -\frac{j\omega\rho N_0 F(\omega) a b e^{jk r_0}}{2\pi r_0} R_1(\theta, \psi) R_2(\theta, \psi), \quad (4)$$

где $N_0 = d_{33} / z t_{мэ} S_{33}^E - \text{const}$;

d_{33} ; S_{33}^E ; z и $t_{мэ}$ – пьезомодуль, упругая податливость, удельный импеданс и межэлектродное расстояние в пьезостержне;

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

$$R_1(\theta, \psi) = \sin\left(\frac{ka}{2} \sin \theta \cos \psi\right) / \frac{ka}{2} \sin \theta \cos \psi \times \sin\left(\frac{kb}{2} \sin \theta \sin \psi\right) / \frac{kb}{2} \sin \theta \sin \psi;$$

$$R_2(\theta, \psi) = \frac{\sin\left(\frac{nk d_1}{2} \sin \theta \cos \psi\right) \sin\left(\frac{mk d_2}{2} \sin \theta \sin \psi\right)}{n \sin\left(\frac{k d_1}{2} \sin \theta \cos \psi\right) m \sin\left(\frac{k d_2}{2} \sin \theta \sin \psi\right)}.$$

Для простоты дальнейшего анализа выражение (4) записано без учета возможного сканирования характеристики направленности (ХН) антенны.

Подобно (1), акустический сигнал, излучаемый антенной, составленной из ПАФВ, можно представить в виде: $s_{ак}^{\Pi}(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_b} p_s(\omega, \theta, \psi) \Phi(\omega) e^{j\omega t} d\omega$. В данном случае звуковое давление $p_s(\omega, \theta, \psi)$ учитывает как ограниченность апертуры антенны и ее направленные свойства, так и задаваемую частотную характеристику излучения $F(\omega)$.

В качестве примера, для макета антенны из 5×6 стержневых ПАФВ, для которых $a = b = 0.01$ м, $d_1 = d_2 = 0.012$ м, на рис. 3 для трех частот формирования акустических импульсов приведены результаты их расчетов $s_{ак}^{\Pi}(t)$ и $s_{ак}(t)$, нормированных к максимальному значению в полосе частот, а также $s_{ак}^{\text{эк}}(t)$ – экспериментально полученные акустические импульсы при возбуждении ПАФВ макета согласно решению задачи синтеза, когда к излучению задавался однопериодный импульс на частоте $f_{им}$. Как видно, учет концентрирующих свойств ограниченной апертуры антенны позволяет улучшить соответствие результатов расчетов и экспериментов при излучении коротких акустических импульсов.

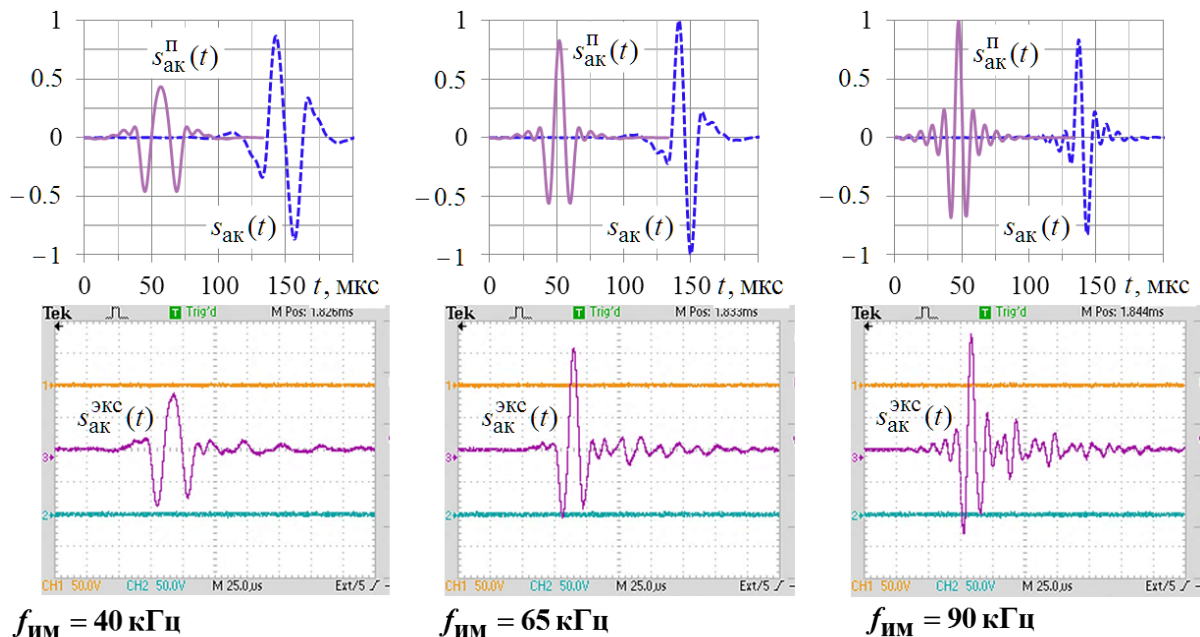


Рис. 3. Сопоставление импульсных характеристик макета 1 и двух расчетных моделей.

Ограниченность как полосы пропускания задаваемой АЧХ для ПАФВ в 2...3 октавы, обусловленная их физической природой и реализуемостью систем возбуждения [7], [10], [13], так и размеров излучающей апертуры антенны приводит к тому, что при перестройке задаваемой частоты $f_{ИМ}$ формирования короткого акустического импульса основная область его спектральной функции $\Phi(\omega)$ со своим максимумом может выйти за нижнюю или верхнюю границу рабочего диапазона частот ПАФВ. Это приводит к обеднению спектральных составляющих, участвующих в формировании акустического импульса и появлению дополнительных колебаний в его структуре, а также – изменению его фактической частоты формирования $\omega_{\phi} = 2\pi f_{\phi}$ относительно заданной $\omega_{ИМ}$. Оценка этого изменения, например, по разнице длительности центрального положительного полупериода (см. рис. 3) заданного и полученного акустических импульсов с последующим пересчетом в частотную область показала следующее. Выход области основного лепестка спектральной функции за низкочастотную границу задаваемой АЧХ излучения приводит к уменьшению длительности импульса относительно её заданной величины, т.е. к повышению ω_{ϕ} относительно $\omega_{ИМ}$, а за высокочастотную границу АЧХ – к увеличению длительности импульса относительно её заданной величины, т.е. к снижению ω_{ϕ} относительно $\omega_{ИМ}$. Указанное обстоятельство уменьшает диапазон перестройки коротких импульсов примерно в 1.5 раза относительно полосы пропускания задаваемой АЧХ излучения.

В качестве примера, на рис. 4 представлены результаты оценки смещения $\Delta f = (f_{ИМ} - f_{\phi}) / f_{ИМ} \cdot 100\%$ частоты формирования f_{ϕ} относительно заданной $f_{ИМ}$, полученной для центрального полупериода импульса рассматриваемого макета из 5×6 стержневых ПАФВ при изменении числа периодов $q = 1; 2, \dots$ задаваемого импульса. Стоит отметить, что при увеличении длительности акустического импульса (параметра q) погрешность Δf соответствия $f_{ИМ}$ и f_{ϕ} достаточно быстро уменьшается, приближая тем самым область перестройки заданной частоты формирования $f_{ИМ}$ акустического импульса к полосе пропускания ПАФВ.

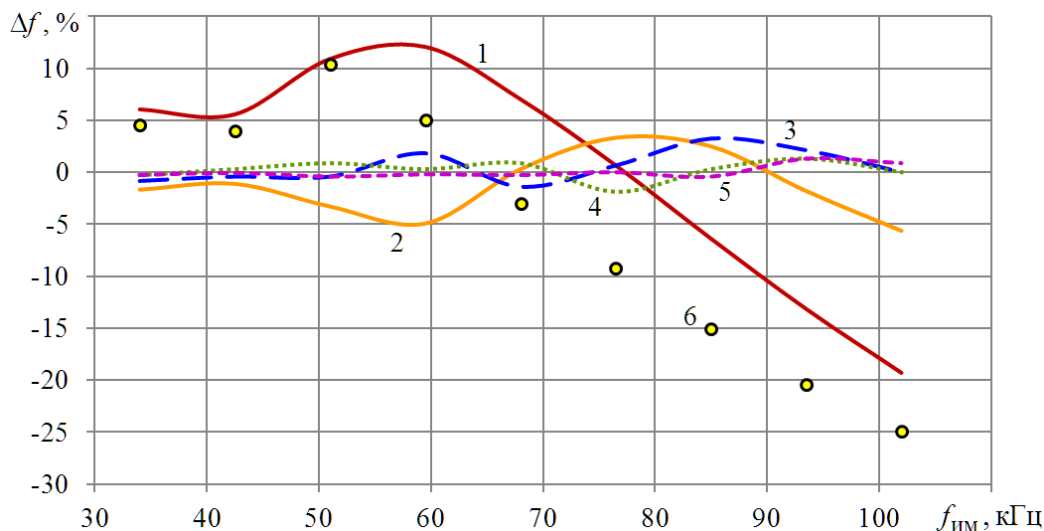


Рис. 4. Изменение частоты формирования акустического импульса в зависимости от задаваемого числа периодов q .

Расчет: 1 – $q = 1$; 2 – $q = 2$; 3 – $q = 3$; 4 – $q = 4$; 5 – $q = 5$. 6 – эксперимент при $q = 1$.

Отставание f_{ϕ} относительно $f_{\text{ИМ}}$ с повышением частоты при излучении ультракороткого импульса также можно проиллюстрировать результатами измерения и расчетов (см. рис. 5) характеристик направленности (ХН), антенны, составленной из 5×6 стержневых ПАФВ, в плоскости содержащей 6 элементов. Задавался однопериодный импульс ($q = 1$), отсчет проводился по максимальной амплитуде полупериода. Как видно, начиная с $f_{\text{ИМ}} \approx 80$ кГц, ХН практически перестает изменяться. Для сопоставления здесь же приведены ХН (кривые 5), полученные при использовании радиоимпульса, содержащего 12 периодов колебаний частотой $f_{\text{ИМ}} = 100$ кГц. При излучении коротких импульсов побочные лепестки ХН не проявляются, что коррелирует с другими работами, например [15].

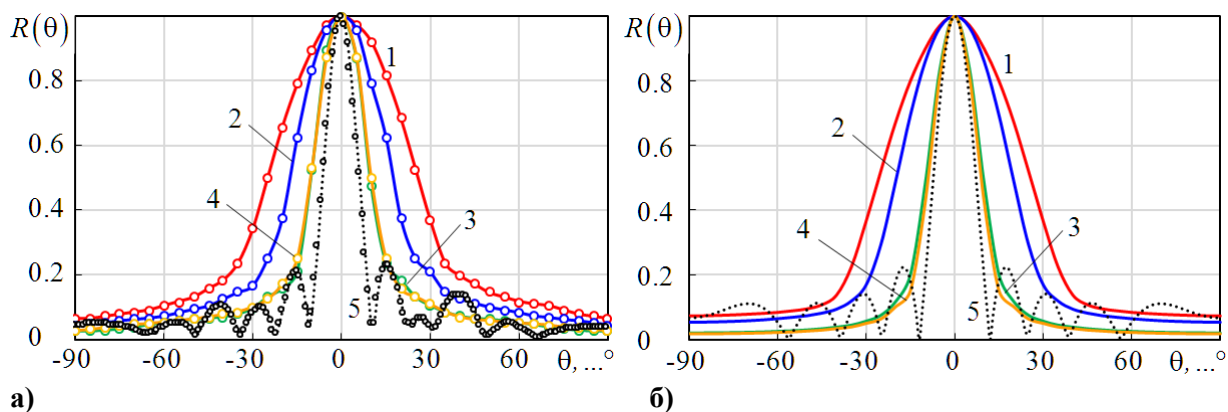


Рис. 5. Экспериментальные (а) и расчетные (б) ХН макета антенны из 5×6 стержневых ПАФВ при излучении короткого импульса ($q = 1$) с заданной частотой $f_{\text{ИМ}}$:

1 – 30 кГц; 2 – 40 кГц; 3 – 80 кГц; 4 – 100 кГц и радиоимпульса с $f_{\text{ИМ}} = 100$ кГц (кривая 5).

Согласно данным расчетов и измерений структура короткого акустического импульса, определенная на оси антенны, сохраняется в сравнительно небольших пределах ширины основного лепестка ХН ($R(\theta) \leq 0.7$), затем эта структура начинает видоизменяться, приближаясь к виду радиоимпульса, как это показано на рис. 6.

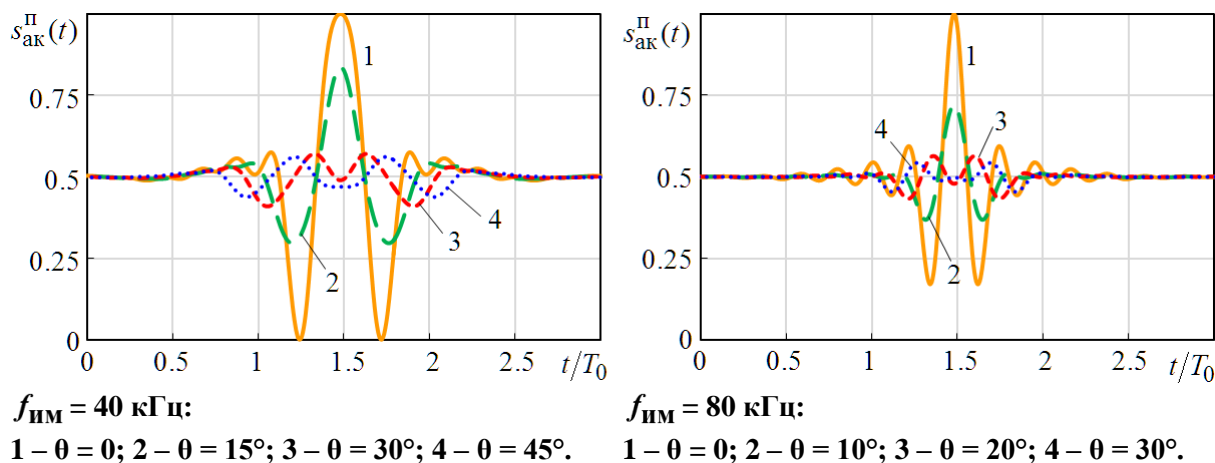


Рис. 6. Изменение структуры однопериодного импульса при увеличении угла θ .

Заключение

Рассмотрено влияние на структуру ультракоротких импульсов, излучаемых сверхширокополосными ПАФВ, изменения частоты их формирования, вида задаваемых АЧХ и ФЧХ излучения, а также – конечности апертуры антенны, составленной из ПАФВ. При задании к излучению однопериодного импульса ($q = 1$), в структуре акустического импульса присутствует дополнительный полупериод, а также возможно отклонение фактической частоты формирования импульса $f_{\text{ф}}$ от заданной $f_{\text{им}}$. С увеличением числа периодов колебаний в задаваемом импульсе ($q > 1$) это отклонение нивелируется, но дополнительный полупериод остается. Очевидно, что его наличие важно при формировании ультракоротких акустических импульсов, но не играет существенной роли для радиоимпульсов. Несмотря на отмеченные особенности формирования ультракоротких импульсов, макеты ПАФВ и система их возбуждения согласно решению задачи синтеза позволяют излучать более сложные по форме акустические сигналы, например, коммуникационные и эхолокационные сигналы дельфинов [8], [13]. Следует также отметить, что при формировании ультракоротких акустических импульсов с помощью стержневых и пластинчатых ПАФВ, возбуждаемых согласно решению задачи синтеза, форма этих импульсов не зависит от параметров фронтальных пассивных слоев (накладок), а максимальная амплитуда импульсов определяется заданным уровнем равномерного участка АЧХ излучения (в данном случае $F_{\text{м}}(\omega) = \text{const}$).

Литература

1. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы // Радиофизика и радиоастрономия, 2008, т. 13, №2, с. 166–194.
2. Черниковская Г.Л. Особенности применения сложных сверхширокополосных сигналов в гидроакустике // Материалы V Всероссийской научной конференции Муром, 26–28 июня 2012 г., с. 371–376.
3. Залогин Н.Н., Калинин В.И., Скарня А.В. Активная локация с использованием широкополосных хаотических сигналов // РЕНСИТ РАЕН. 2011. т. 3, № 1, с. 3–8.
4. Залогин Н.Н., Скарня А.В. Зондирующие сигналы для активной локации высокого пространственного разрешения // РЕНСИТ РАЕН. 2016. т. 8, № 1, с. 3–17.
5. Карабанов В.И., Миронов А.С. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. Хабаровск: Изд. ТОГУ. 2018. 140 с.
6. Гидроакустическая энциклопедия / под ред. В.И. Тимошенко. Таганрог: Изд-во ТГРУ, 1999. с. 696–697 (787 с).

7. Степанов Б.Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. журн. 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.
8. Степанов Б.Г. Об излучении коротких акустических сигналов стержневыми преобразователями с фазированным возбуждением их двух частей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 8. С. 67–75.
9. Зайцева Н.А., Степанов Б.Г. Ультразвуковой широкополосный преобразователь с фазированным возбуждением двух образующих его пьезопластин // Дефектоскопия. № 1. 2015. С. 28–39.
10. Быстрова Н.А., Степанов Б.Г. Импульсный режим работы пластинчатого преобразователя с амплитудно-фазовым возбуждением образующих его пьезопластин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 3. С. 5–11.
11. Патент на полезную модель № 173582. Устройство формирования акустических импульсов / Степанов Б.Г. Оpubл. 31.08.2017, Бюл. 25.
12. Степанов Б.Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2013, № 3, с. 87–96.
13. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Исследование широкополосной гидроакустической системы, содержащей преобразователи волноводного типа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 60–70.
14. Пестерев И.С., Степанов Б.Г. Обобщенная модель преобразователя волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 2. С. 35–45.
15. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Влияние переходных процессов в преобразователях на направленность антенны в импульсном режиме // Акуст. журн. 1994. Т.40. № 3. С. 457–458.