

Сравнение методов описания параметрической излучающей антенны при расчете акустического давления на разностной частоте при излучении широкополосного сигнала для гидролокационных систем вертикального зондирования

А. С. Воротынцева¹✉, А. А. Алимов²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ avorotynceva@yandex.ru

Аннотация. Приводится сравнительный анализ по расчетам акустического давления на разностной частоте посредством различных методов описания параметрической антенны при излучении широкополосного сигнала применительно к трем средствам вертикального зондирования – эхолоту, системе измерения толщины льда и профилографу донного грунта. Показана зависимость акустического давления от разностной частоты параметрической излучающей антенны, а также зависимость требуемого акустического давления от параметра сложности излучаемого сигнала для различных методов описания параметрической излучающей антенны – Моффетта–Меллена, уравнения Хохлова–Заболотской–Кузнецова и метода волновых фронтов. Установлено, что при увеличении параметра сложности зондирующего сигнала требуется меньшее (по сравнению с сигналом меньшей сложности) акустическое давление для промера дистанций в заданной гидрологической обстановке.

Ключевые слова: параметрическая излучающая антенна, широкополосный сигнал, вертикальное зондирование, нелинейная гидроакустика

Для цитирования: Воротынцева А. С., Алимов А. А. Сравнение методов описания параметрической излучающей антенны при расчете акустического давления на разностной частоте при излучении широкополосного сигнала для гидролокационных систем вертикального зондирования // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 3. С. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-3-5-12.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Comparison of Description Methods of the Parametric Radiating Antenna when Calculating the Acoustic Pressure at the Difference Frequency when Radiating a Broadband Signal for Vertical Sonar Sensing Systems

A. S. Vorotyntseva¹✉, A. A. Alimov²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia
✉ avorotynceva@yandex.ru

Abstract. Provides a comparative analysis of the calculation methods of a parametric antenna when radiating a broadband signal in relation to three vertical sonar sensing systems – echosounder, ice fathometer and bottom

soil profiling device. The dependence of the acoustic pressure on the difference frequency of the parametric radiating antenna is shown, as well as the dependence of the required acoustic pressure on the complexity of the radiated signal for various description methods – Moffett–Mellen method, Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov equation and wavefront method. It has been found that with an increase in the complexity of the sounding signal, less acoustic pressure is required (compared to a system with a smaller complexity) to measure distances under specified hydrological conditions.

Keywords: parametric radiating antenna, broadband signal, vertical sensing, nonlinear acoustics

For citation: Vorotyntseva A. S., Alimov A. A. Comparison of Description Methods of the Parametric Radiating Antenna when Calculating the Acoustic Pressure at the Difference Frequency when Radiating a Broadband Signal for Vertical Sonar Sensing Systems // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 3. P. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-3-5-12.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Введение. При исследовании и освоении пространств и ресурсов Мирового океана наиболее распространены гидролокационные системы вертикального зондирования – эхолоты, предназначенные для навигационных задач, промерных работ, рыбопоисковой промышленности; системы измерения толщины льда и профилографы донного грунта – гидроакустические средства (ГАС), предназначенные для дистанционного зондирования ледового покрова и придонных слоев [1].

При исследовании Мирового океана актуальной проблема обеспечения высокой разрешающей способности при большой дальности действия ГАС для малогабаритных носителей, решение весьма затруднительно при применении традиционных методов линейной акустики [2]–[4]. Альтернативной для преодоления указанной проблемы служит применение параметрических излучающих антенн (ПИА), основанных на свойстве взаимодействия акустических сигналов высоких частот (первичных сигналов, сигналов накачки) с нелинейной средой (водой).

В результате нелинейного взаимодействия при работе ПИА возникает высоконаправленное излучение (с шириной характеристики направленности (ХН), равной ширине ХН сигналов накачки) на низкой частоте, равной разности двух первичных сигналов (разностная частота). При этом ХН на разностной частоте имеет ничтожно малые уровни боковых лепестков в сравнении с традиционными линейно-акустическими антеннами. Недостатком параметрических антенн служит низкий коэффициент преобразования, не превышающий на практике 2 % [5]–[6].

Частичному преодолению этого недостатка, а также повышению эффективности работы ГАС в целом, как показано в [6]–[10], способствует применение зондирующих сигналов большой базы,

т. е. сигналов, частотно-временное произведение которых (обозначаемое также параметром сложности) значительно превышает единицу.

Указанные преимущества ПИА в сравнении с традиционными линейными антеннами позволяют сделать вывод о том, что антенны с параметрическим режимом излучения – это перспективное решение в задачах проектирования современных ГАС вертикального зондирования.

Расчет ПИА в конечном итоге сводится к выбору оптимальных частот сигнала накачки и акустического давления на частотах накачки [6]. При этом ожидаемое значение акустического давления на разностной частоте может предполагаться различным в зависимости от выбора метода описания ПИА. К настоящему моменту известно несколько методов описания, в основе которых лежат различные граничные условия, модели среды, физические приближения и проч. [11].

Впервые аналитические выражения для расчета акустического давления и характеристики направленности ПИА были получены в 1963 г. американским физиком, профессором Брауновского университета П. Дж. Вестервельтом [12]. Однако позже в ходе экспериментальных исследований будет показано, что расчеты по этому методу вовсе не совпадают с экспериментальными данными [13], и поэтому в настоящее время метод Вестервельта не используется для расчета ПИА.

Однако прикладное значение исследований Петера Вестервельта возымело большой эффект по всему миру и способствовало старту фундаментальных и прикладных исследований в области нелинейной гидроакустики – к 1960-м гг. появились работы и других ученых, заинтересованных в исследовании эффекта параметрического излучения звука [14]. Так, в начале 1960-х гг. учеными из СССР была создана современная теория ПИА, основанная на решении нелинейного урав-

нения акустики, предложенном Е. А. Заболотской и Р. В. Хохловым и в дальнейшем существенно дополненном В. П. Кузнецовым – модель ПИА, известная как метод описания по уравнению Хохлова–Заболотской–Кузнецова (ХЗК) [6].

В 1977 г. исследователями Центра подводных исследований ВМС США М. Моффеттом и Р. Мелленом были обобщены известные на то время результаты теоретических и экспериментальных исследований – Моффетт и Меллен несколько уточнили метод Вестервельта, учитывая в новом методе (известном на настоящий момент как метод Моффетта–Меллена [15], далее – ММ) расхождение первичных волн, а также нелинейное поглощение, т. е. эффекты, связанные с искажением волнового профиля при распространении акустической волны в водной среде [6].

Несколько позже, в 1985 г. сотрудником ЦНИИ «Морфизприбор» В. Б. Железным был выведен еще один метод описания ПИА, названный методом волновых фронтов (МВФ), полномерно описанный в [16]. В соответствии с данным методом поле параметрической антенны создается посредством незначительного превращения волнового фронта накачки в ходе распространения в набор суммирующихся элементарных волновых фронтов поля разностной частоты, амплитудное значение которых устанавливалось на основе результатов метода Зверева–Калачева [17].

По причине того, что ожидаемые значения акустического давления на разностной частоте, полученные по разным методам описания ПИА, значительно различаются, для четкого понимания различий этих методов необходимо их сопоставление. Качественное и полномерное сравнение данных методов описания ПИА представлено в [11], где приведены результаты моделирования по сопоставлению давлений на разностных частотах для различных диаметров источников накачки; показана зависимость ожидаемого акустического давления от разностной частоты по различным методам.

Как было показано, повышению эффективности ПИА способствует использование широкополосных сигналов в качестве зондирующих. Несмотря на наличие большого количества публикаций по темам разработки, исследования и применения ПИА, вопросы нелинейного взаимодействия широкополосных сигналов и работы ПИА при излучении таких сигналов исследованы на сегодняшний день не в полной мере.

Следовательно, для дальнейшего развития теории ПИА и достижения создания систем с параметрическим режимом излучения, имеющих высокие технические характеристики, требуются исследования, учитывающие сравнение расчетных методов ПИА при работе с широкополосным сигналом. Таким образом, целью работы является сравнение расчетных методов параметрической антенны при излучении широкополосного сигнала, объектом исследования – параметрическая излучающая антенна.

Методы описания параметрической излучающей антенны. Рассмотрим наиболее используемые методы описания параметрических излучающих антенн. Один из методов – ММ, позволяет получить значение акустического давления на разностной частоте p_F по следующему выражению [15]:

$$p_F = \frac{\sqrt{2\pi\epsilon F p_{f_1} p_{f_2}}}{\rho c^3} \text{Ei} \left(\frac{2\alpha_f S f^2}{cF} \right), \quad (1)$$

где ϵ – параметр нелинейности, обычно при расчетах принимается равным в водной среде 3.5...3.9; F – рабочая (разностная) частота; p_{f_1}, p_{f_2} – давление на сигналах накачки, ρ – плотность среды распространения сигнала; c – скорость распространения звука; $\alpha_f = 1.8 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1.5} / 0.4343$ – коэффициент поглощения на средней частоте сигнала накачки $f = \frac{f_1 + f_2}{2}$, Нп/м (здесь f_1 и f_2 – частоты накачки, кГц); $S = \pi d^2 / 4$ – площадь источника накачки;

$$\text{Ei}(z) = \int_z^{\infty} \frac{\exp(-t)}{t} dt,$$

– интегральная экспоненциальная функция, где z – аргумент функции, в данном случае $z = \frac{2\alpha_f S f^2}{cF}$; t – переменная интегрирования.

По МВФ акустическое давление на разностной частоте описывается выражением [16]

$$p_F = \frac{\sqrt{2\pi\epsilon F p_{f_1} p_{f_2}}}{\rho c^3} \int_{R_\Phi}^{\infty} \frac{\exp(-2\alpha_f x)}{x} dx, \quad (2)$$

где в нижнем пределе интегрирования $R_\Phi = \pi d^2 f / 4c$ – длина зоны Френеля; d – диаметр источника; x – переменная интегрирования.

В соответствии с уравнением ХЗК расчет ПИА проводится по формуле [18]

$$p_F = \frac{i\epsilon\pi F^2 p_{f_1} p_{f_2}}{\sqrt{2}\rho c^2 S f^2} \exp(-\alpha_F z) \times \int_0^{z_3} \frac{\exp(-y)}{b + i(y - z_3) + z_3 y B} dy, \quad (3)$$

где $\alpha_F = 1.8 \cdot 10^{-6} \cdot F^{1.5} / 0.4343$ – коэффициент поглощения на разностной частоте; $z = 5l_3$ – расстояние от источника до точки наблюдения; $l_3 = 1/\alpha_f$ – длина зоны затухания; $z_3 = z/l_3$ – приведенное расстояние; $b = FS/cl_3$ – безразмерный коэффициент; i – мнимая единица; y – переменная интегрирования; $B = L_d l_3 / l_{d1} l_{d2}$ – безразмерный коэффициент, $L_d = FS/c$ – длина зоны дифракции для разностной частоты, $l_{d1} = f_1 S/c$, $l_{d2} = f_2 S/c$ – длина зоны дифракции для частот накачки.

По математическому описанию (1)–(3) выполним построение графической зависимости давления $p_F(F)$, развиваемого ПИА от разностной частоты, находящейся в пределах от 500 Гц до 10 кГц. При этом в расчете учитываются следующие исходные данные: излучатель накачки имеет конфигурацию «плоский диск» диаметром $d = 0.45$ м; значения давлений на накачке $p_{f_1} = p_{f_2} = 100$ кПа · м; средняя частота накачки $f = 100$ кГц; значения параметров среды распространения сигнала: плотность $\rho = 1000$ кг/м³; скорость звука $c = 1500$ м/с; параметр нелинейности среды $\epsilon = 3.5$. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1.

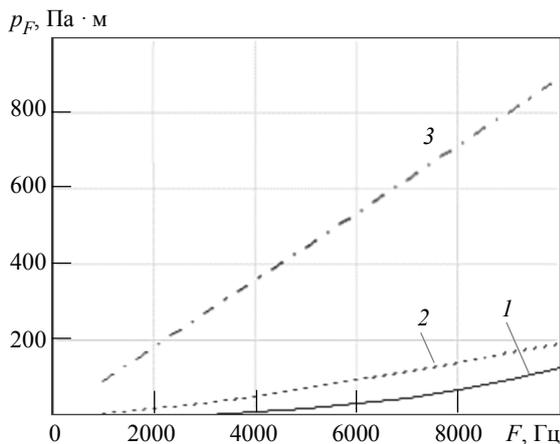


Рис. 1. Результаты расчетов зависимости давления $p_F(F)$: 1 – ММ; 2 – ХЗК; 3 – МВФ

Fig. 1. Results of the calculations of pressure dependence $p_F(F)$: 1 – Moffett–Mellen method; 2 – Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov equation; 3 – wavefront method

Из построений, приведенных на рис. 1, видно, что полученные значения по МВФ значительно превышают расчетные значения по методам ММ и ХЗК, притом что значения по ХЗК превышают значения по ММ, что согласуется с результатами, полученными в [11].

Сравнение расчетных методов параметрической антенны при излучении сложного сигнала. Расчет любого активного гидроакустического средства, к которым в том числе относятся перечисленные ГАС вертикального зондирования, проводится в соответствии с уравнением активной гидролокации, предписывающим превышение уровня полезного сигнала над уровнем помех [1]:

$$I_c > \frac{\delta^2 P_{\Pi}^2}{\rho c}, \quad (4)$$

где I_c – интенсивность эхосигнала на входе приемной антенны; δ – коэффициент распознавания; P_{Π} – давление помех.

Параметр интенсивности эхосигнала I_c , содержащийся в (4), для эхолота определяется по выражению [3]:

$$I_c = \frac{W_{\text{ак}} K_{\text{изл}} c T \mu^2}{8\pi H^3} 10^{-0.2\beta H}, \quad (5)$$

где $W_{\text{ак}}$ – излучаемая антенной акустическая мощность; $K_{\text{изл}}$ – коэффициент концентрации излучающей антенны; T – длительность зондирующего импульса; μ – коэффициент отражения от дна; H – измеряемая дистанция (в знаменателе учитывается в метрах, в показателе – в километрах); β – коэффициент пространственного затухания звука в воде, дБ/км [3]: $\beta = 0.036 f^{1.5}$.

Одним из авторов в [19] ранее получено выражение, устанавливающее зависимость требуемого акустического давления для промера заданной глубины H при определенных гидрологических условиях:

$$p_f(Q) = \frac{186qp_0\sqrt{cH^3}}{\mu T_0 f_0 a_{\text{пр}} f Q} 10^{0.1\beta H}, \quad (6)$$

где частоты – в килогерцах; глубина в числителе – в метрах, в показателе – в километрах, $Q = T\Delta f$ – сложность сигнала – частотно-временное произведение или произведение T на ширину полосы Δf ; q – параметр обнаружения; p_0 – приведенный уровень помех; T_0 и f_0 – парциальный импульс и верхнее значение частоты спектра пар-

циального импульса соответственно; $a_{\text{пр}}$ – радиус приемной антенны.

Рабочей частотой ГАС вертикального зондирования с параметрическим режимом излучения служит разностная частота F – соответственно, произведя в выражении (6) необходимую подстановку $f \rightarrow F$, получим требуемое акустическое давление на разностной частоте p_F .

Для определения необходимого давления на частотах накачки p_f воспользуемся выражениями (1)–(3) и представим в них давление p_F в виде (6). Произведя несложные преобразования, получим зависимости давления на частотах накачки f от сложности излучаемого сигнала Q для различных методов описания ПИА. Для метода ММ зависимость описывается следующим образом:

$$p_f(Q) = \left[\frac{1.41 \cdot 10^{14} q p_0 \sqrt{cH^3}}{\varepsilon \mu T_0 f_0 a_{\text{пр}} Q F^2} \frac{10^{0.1\beta H}}{\text{Ei}\left(\frac{2\alpha_f S f^2}{cF}\right)} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где численный коэффициент $1.41 \cdot 10^{14}$ получен за счет расчета постоянных численных коэффициентов типа $186, \pi, \rho, c$ и проч. Для МВФ полученная аналогичным образом зависимость от сложности сигнала описывается выражением

$$p_f(Q) = \left[\frac{1.41 \cdot 10^{14} q p_0 \sqrt{cH^3}}{\varepsilon \mu T_0 f_0 a_{\text{пр}} Q F^2} \frac{10^{0.1\beta H}}{\int_{R_{\Phi}}^{\infty} \frac{\exp(-2\alpha_f x)}{x} dx} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

для ХЗК:

$$p_f(Q) = \left[\frac{1.88 \cdot 10^{11} q p_0 \sqrt{cH^3} S f^2}{i \varepsilon \mu T_0 f_0 a_{\text{пр}} Q F^3} \times \frac{10^{0.1\beta H}}{\exp(-\alpha_F z) \int_0^{z_3} \frac{\exp(-y)}{b + i(y - z_3) + z_3 y B} dy} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

где обозначения аналогичны входящим в (3).

Проведем численное моделирование по математическому описанию (7)–(9). Дополнительно к расчетным параметрам: центральная разностная частота выбирается $F = 10$ кГц; радиус приемной антенны $a_{\text{пр}} = 0.5$ м; коэффициент отражения $\mu = 0.1$ в обеспечение расчета максимального зна-

чения требуемого давления; $H = 6000$ м; диапазон сложности сигнала: $Q = 36 \dots 896$ Гц · с. Результаты расчетов, представленные на рис. 2, отражают зависимость требуемого акустического давления на частоте накачки от сложности излучаемого сигнала.

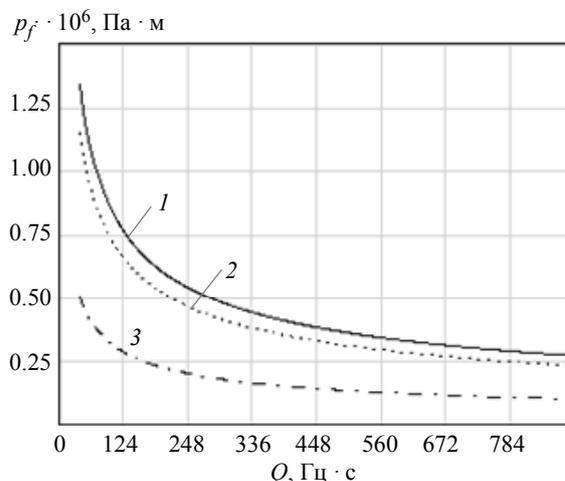


Рис. 2. Результаты расчетов зависимости давления на частотах накачки $p_f(Q)$: 1 – ММ; 2 – ХЗК; 3 – МВФ
Fig. 2. Results of the calculations of pressure dependence $p_f(Q)$: 1 – Moffett–Mellen method; 2 – Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov equation; 3 – wavefront method

Из построений, приведенных на рис. 2, видно, что значения по ММ превышают значения, полученные по МВФ и ХЗК. Полученные зависимости для разных методов имеют одинаковый ход, но существенно различаются по численному значению. Анализ кривых рис. 2 показывает, что акустическое давление как функция $p_f(Q)$ находится в обратной зависимости от значения базы сигнала, т. е. при излучении ПИА сигнала, имеющего более широкую полосу частот (и/или большую длительность), для промера определенной глубины в заданных гидрологических условиях требуется создавать меньшее акустическое давление в сравнении с излучением сигнала меньшей базы.

Из теории ПИА известно [6], что давление на частотах накачки p_{f_1}, p_{f_2} и на разностной частоте p_F связаны коэффициентом преобразования энергии

$$\zeta = \frac{p_F}{\sqrt{p_{f_1} p_{f_2}}} \approx \frac{p_F}{p_f}, \quad (10)$$

который на практике составляет, как правило, 0.2...2.0 %.

В соответствии с определенными выражениями, описывающими зависимость давления на частоте накачки от сложности излучаемого сигнала по различным методам описания ПИА

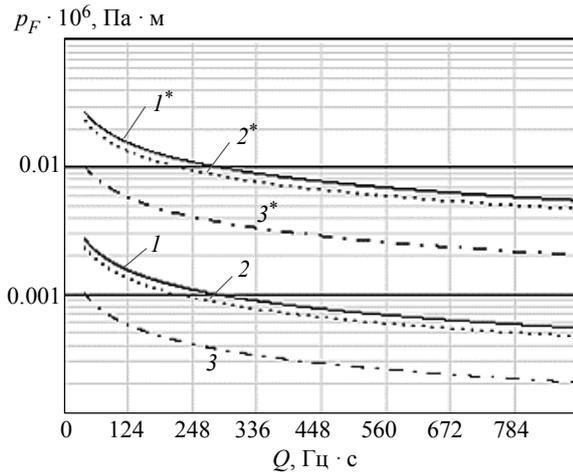


Рис. 3. Результаты расчетов зависимости давления на разностной частоте $p_F(Q)$: 1 – ММ; 2 – ХЗК; 3 – МВФ (минимальное ожидаемое значение), I^* – ММ; 2^* – ХЗК; 3^* – МВФ (максимальное ожидаемое значение)
Fig. 3. Results of the calculations of pressure dependence $p_F(Q)$: 1 – Moffett–Mellen method; 2 – Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov equation; 3 – wavefront method (minimum predicted value); I^* – Moffett–Mellen method; 2^* – Khokhlov–Zabolotskaya–Kuznetsov equation; 3^* – wavefront method (maximum predicted value)

(7)–(9), а также учитывая (10), построим зависимость требуемого давления на разностной частоте p_F от сложности сигнала.

На рис. 3 (в логарифмическом масштабе) представлены расчеты требуемого давления на разностной частоте в зависимости от сложности излучаемого сигнала, где сплошной линией показано минимальное значение ожидаемого давления на разностной частоте (при $\zeta = 0.2\%$), пунктирной линией – максимальное значение (при $\zeta = 2.0\%$). Очевидно, что полученные зависимости имеют такой же характер и соотносятся между собой так же, как и расчетные значения требуемого давления на частотах накачки (рис. 2).

Если рассматривать сравнение расчетных методов ПИА профилографа и системы измерения толщины льда, необходимо учитывать дополнительную задачу зондирования донных слоев и слоя льда соответственно, что в формульной записи предполагает дополнительные расчетные компоненты. Для системы измерения толщины льда формула (6) преобразуется к виду

$$p_f(Q) = \frac{186qp_0\sqrt{cH_{\text{п}}^3}}{\mu T_0 f_0 a_{\text{пр}} f Q} 10^{0.1(\beta_{\text{в}} H_{\text{п}} + \beta_{\text{л}} H_{\text{л}})}, \quad (11)$$

где $H_{\text{п}}$ – глубина погружения акустической антенны; $H_{\text{л}}$ – толщина льда; $\beta_{\text{в}}$, $\beta_{\text{л}}$ – коэффициенты пространственного затухания акустического сигнала в

воде и во льду соответственно. Для профилографа, в (11) необходимо учитывать: $H_{\text{п}} \rightarrow H_{\text{в}}$ – расстояние от активной поверхности антенны до границы раздела «вода–дно»; $H_{\text{л}} \rightarrow H_{\text{г}}$ – толщина слоя грунта; $\beta_{\text{л}} \rightarrow \beta_{\text{г}}$ – коэффициент поглощения в грунте:

$$\beta_{\text{г}} = \beta_0 f, \quad (12)$$

причем значение β_0 в (12) зависит от физико-механических характеристик определенного грунтового слоя и представляет собой классификационный признак при отнесении типа грунта к тому или иному классу (ил, песок, скальное основание и проч.)

Подставляя выражение типа (11) в расчетные методы (7)–(9), получим аналогичные зависимости, приведенные на рис. 2 и 3.

Закключение. В статье представлено сопоставление методов описания параметрического излучателя. Представлены расчеты по трем методам: методу Моффетта–Меллена, методу волновых фронтов и методу описания по уравнению ХЗК в виде графических зависимостей давления на разностной частоте от частоты сигнала. Показано, что значения по МВФ превышают значения, полученные по ММ и ХЗК, притом что значения по ХЗК превышают значения по ММ, с ростом разностной частоты возрастает значение акустического давления, причем по МВФ увеличение происходит значительно быстрее в сравнении с ММ и ХЗК.

Получены расчетные соотношения для трех методов описания ПИА, устанавливающие зависимость требуемого акустического давления (на частотах накачки и на разностной частоте) от параметра сложности зондирующего сигнала, по найденным соотношениям построены графические зависимости. Из графических зависимостей видно, что при расчете параметрической антенны по МВФ требуется создавать меньшее давление на разностной частоте по сравнению с методами ММ и ХЗК.

Очевидно, что значительное различие результатов расчета по представленным методам предполагает последующие исследования в этом направлении и дальнейшее развитие теории параметрических излучающих антенн. Также необходимо отметить, что для верификации полученных результатов и полноценного сопоставления расчетных методов ПИА требуется их сравнение с экспериментальными данными.

Полученные результаты могут быть применены на практике для проектирования ПИА, работающих с широкополосным сигналом, оценки акустического давления, сравнения теоретических и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Богородский А. В., Островский Д. Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследовательские средства. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 244 с.
2. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984. 304 с.
3. Судовые эхолоты / А. А. Хребтов, К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарев, Б. М. Манулис, Б. А. Осюхин. Л.: Судостроение, 1982. 232 с.
4. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 409 с.
5. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Расчет основных характеристик параметрической излучающей антенны // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 17–23.
6. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
7. Бровин А. В. Средства и методы подводных исследований прибрежной зоны // Морской сб. 2011. № 5(1970). С. 33–41.
8. Карабанов И. В., Миронов А. С. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 140 с.
9. Параметрический эхолот-профилограф с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала / В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 11. С. 1–9. URL: <https://jre.cplire.ru/jre/nov21/11/text.pdf> (дата обращения: 19.02.2025).
10. Воронин В. А., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Использование методов нелинейной акустики в современных гидролокационных технологиях // Изв. ТРТУ. 2005. № 2(46). С. 51–56.
11. Железный В. Б., Островский Д. Б. Сопоставление расчетных значений давлений на разностных частотах, полученных по различным моделям параметрического излучения звука // Тр. XVII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА–2024)». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С. 133–135.
12. Westerwelt P. J. Parametric acoustic array // J. of the Acoust. Soc. of America, 1963. Vol. 35, № 4. P. 535–537.
13. Островский Д. Б. О параметрических антеннах. Из истории отечественной гидроакустики. СПб.: Изд-во ГНЦ ЦНИИ им. Крылова, 1998. С. 442–459.
14. Зверев В. А. Как зарождалась идея параметрической антенны // Акуст. журн. 1999. Т. 45, № 5. С. 685–692.
15. Mellen R., Moffett M. An approximate model for parametric acoustic source design // Ocean 72 – IEEE Intern. Conf. on Engin. in the Ocean Environment. Newport, RI, USA: IEEE, 1972. P. 256–258.
16. Железный В. Б. Об описании параметрических излучающих антенн на основе модели волновых фронтов // Гидроакустика. 2019. № 4(40). С. 5–12.
17. Зверев В. А., Калачев А. И. Измерение рассеяния звука звуком при наложении параллельных пучков // Акуст. журн. 1968. Т. 14, № 2. С. 214–220.
18. Зарембо Л. К., Тимошенко В. И. Нелинейная акустика. М.: Изд-во МГУ, 1984. 104 с.
19. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Расчет энергетических характеристик гидролокационных систем вертикального зондирования при учете сложности излучаемого сигнала // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 19–25.

Информация об авторах

Воротынцева Алена Сергеевна – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники, ассистент кафедры физики, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Алимов Артем Александрович – магистрант гр. 1165, Санкт-Петербургский гос. морской технический университет, ул. Лоцманская, 3, Санкт-Петербург, 190121, Россия.

E-mail: alimov080702rus@mail.ru

References

1. Bogorodskij A. V., Ostrovskij D. B. Gidroakusticheskie navigacionnye i poiskovo-obsledovatel'skie sredstva. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LJeTI», 2009. 244 s. (In Russ.).
2. Smaryshev M. D., Dobrovolskij Ju. Ju. Gidroakusticheskie anteny. L.: Sudostroenie, 1984. 304 s. (In Russ.).
3. Sudovye jeholoty / A. A. Hrebtov, K. A. Vinogradov, V. N. Koshkarev, B. M. Manulis, B. A. Osjuhin. L.: Sudostroenie, 1982. 232 s. (In Russ.).
4. Korjakin Yu. A., Smirnov S. A., Yakovlev G. V. Korabelnaja gidroakusticheskaja tehnika. Sostojanie i aktualnye problemy. SPb.: Nauka, 2004. 409 s. (In Russ.).
5. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Raschet osnovnyh harakteristik parametricheskoj izluchajushhej anteny // Izv. SPbGETU «LJeTI». 2025. T. 18, № 6. S. 17–23. (In Russ.).
6. Novikov B. K., Rudenko O. V., Timoshenko V. I. Nelinejnaja gidroakustika. L.: Sudostroenie, 1981. 264 s. (In Russ.).
7. Brovin A. V. Sredstva i metody podvodnyh issledovanij pribrezhnoj zony // Morskoj sb. 2011. № 5 (1970). S. 33–41. (In Russ.).
8. Karabanov I. V., Mironov A. S. Algoritmy obrabotki gidroakusticheskikh signalov. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. GU, 2018. 140 s. (In Russ.).

9. Parametricheskij jeholot-profilograf s linejnoj chasotnoj moduljaciej zondirujushhego signala / V. I. Kaevicer, A. P. Krivcov, I. V. Smol'janinov, A. V. Jelbakidze // Zhurn. radioelektroniki. 2021. № 11. S. 1–9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov21/11/text.pdf> (data obrashhenija: 19.02.2025). (In Russ.).
10. Voronin V. A., Tarasov S. P., Timoshenko V. I. Ispol'zovanie metodov nelinejnoj akustiki v sovremennyh gidrolokacionnyh tehnologijah // Izv. TRTU. 2005. № 2(46). S. 51–56. (In Russ.).
11. Zheleznyj V. B., Ostrovskij D. B. Sopostavlenie raschetnyh znachenij davlenij na raznostnyh chastotah, poluchennyh po razlichnym modeljam parametricheskogo izlucheniya zvuka // Tr. XVII Vseros. konf. «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki (GA-2024)». SPb.: POLITEP-PRESS, 2024. S. 133–135. (In Russ.).
12. Westerwelt P. J. Parametric acoustic array // J. of the Acoust. Soc. of America, 1963. Vol. 35, № 4. P. 535–537.
13. Ostrovskij D. B. O parametricheskikh antennah. Iz istorii otechestvennoj gidroakustiki. SPb.: Izd-vo GNTs TsNII im. Krylova, 1998. S. 442–459. (In Russ.).
14. Zverev V. A. Kak zarozhdalas ideja parametricheskoj anteny // Akust. zhurn. 1999. T. 45, № 5. S. 685–692. (In Russ.).
15. Mellen R., Moffett M. An approximate model for parametric acoustic source design // Ocean 72 – IEEE Intern. Conf. on Engin. in the Ocean Environment. Newport, RI, USA: IEEE, 1972. P. 256–258.
16. Zheleznyj V. B. Ob opisanih parametricheskikh izluchajushhih antenn na osnove modeli volnovyh frontov // Gidroakustika. 2019. № 4(40). S. 5–12. (In Russ.).
17. Zverev V. A., Kalachev A. I. Izmerenie rassejanija zvuka zvukom pri nalozhenii paralelnyh puchkov // Akust. zhurn. 1968. T. 14, № 2. S. 214–220. (In Russ.).
18. Zarembo L. K., Timoshenko V. I. Nelinejnaja akustika. M.: Izd-vo MGU, 1984. 104 s. (In Russ.).
19. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Raschet jenergeticheskikh harakteristik gidrolokacionnyh sistem vertikal'nogo zondirovanija pri uchete slozhnosti izluchaemogo signala // Izv. SPbGETU «LJeTI». 2025. T. 18, № 2. S. 19–25. (In Russ.).

Information about the authors

Alena S. Vorotynseva – postgraduate student of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, assistant of the Department of Physics, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Artem A. Alimov – master student of gr. 1165, Saint Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya St., 3, Saint Petersburg, 190121, Russia.
E-mail: alimov080702rus@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.11.2025; принята к публикации после рецензирования 02.02.2026; опубликована онлайн 30.03.2026.

Submitted 30.11.2025; accepted 02.02.2026; published online 30.03.2026.
