

УДК 534.6.08

НЕЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

© 2015 г. А. М. Гаврилов

*Инженерно-технологическая академия Южного Федерального университета
347928 Таганрог, ГСП-17А, Некрасовский пер. 44*

E-mail: gavr_am@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2014 г.

Рассмотрен метод измерения АЧХ излучателя звука, основанный на нелинейном взаимодействии двух волн накачки с близкими частотами, который исключает необходимость звукоприемника с известной частотной зависимостью чувствительности. Амплитудно-частотная характеристика излучателя определяется по измеренной зависимости амплитуды волны разностной частоты от средней частоты накачки при условии, что разностная частота остается неизменной. Показана возможность определения параметров излучателя (добротность, полоса пропускания) без нахождения амплитудно-частотной характеристики. Метод реализован в автоматическом режиме.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, нелинейное взаимодействие, волна разностной частоты, частотная расстройка, волна накачки.

DOI: 10.7868/S0320791915030065

ВВЕДЕНИЕ

Важным направлением развития ультразвуковых приборов неразрушающего контроля и медицинской диагностики, гидроакустической и измерительной аппаратуры является использование широкополосных (“сложных”) сигналов. При соответствующей обработке таких сигналов удается расширить объем и улучшить качество получаемой информации, увеличить дальность действия аппаратуры, разрешающую способность, отношение сигнал/помеха.

Искажения широкополосного сигнала на этапах его передачи и распространения затрудняют решение поставленной задачи из-за происходящего нарушения структуры сигнала, сопровождаемого изменением его амплитудного и фазового спектров. В подобных случаях полезный эффект от использования “сложных” сигналов резко снижается [1], делая их регистрацию невозможной из-за отсутствия отклика на выходе согласованного фильтра даже в условиях, когда на входе узла обработки отношение сигнал/помеха значительно выше единицы [2].

Линейные искажения используемых сигналов возникают уже в самой аппаратуре, начиная с этапа излучения и заканчивая приемом эхосигналов, что вызвано частотно-зависимой функцией передачи электрического, электроакустического и акустического трактов. Причины такого положения не всегда можно исключить из-за объективно существующих технических и физических ограничений – резонансного характера электро-

механического преобразования сигнала в гидроакустических антеннах и преобразователях дефектоскопов, частотно-зависимого характера дифракционных процессов при излучении волн и др.

Нежелательные последствия для работы аппаратуры удается исключить коррекцией (введением предискажений) подаваемого на излучатель электрического сигнала, либо учетом искажений при обработке принятого эхосигнала. Для этого необходимо знать амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики излучающего и приемного трактов, которые определяются частотно-зависимыми цепями электрического тракта, электроакустическим преобразователем и дифракционными процессами при распространении излученной волны [3].

Необходимость использования градуированных приемников (излучателей) для измерений АЧХ и ФЧХ приемно-излучающего тракта ультразвуковой и гидроакустической аппаратуры [4, 5] часто становится самостоятельной проблемой из-за отсутствия надежных прямых методов их градуировки. Это вызвано трудностью учета дифракционных искажений, критичностью к нестабильности рабочей частоты, точности определения скорости звука в среде, расстояния между излучателем и приемником. Высокая трудоемкость известных методов градуировки препятствует автоматизации измерений, сводя их использование к минимуму.

В связи с этим актуальной является необходимость разработки новых методов измерений АЧХ

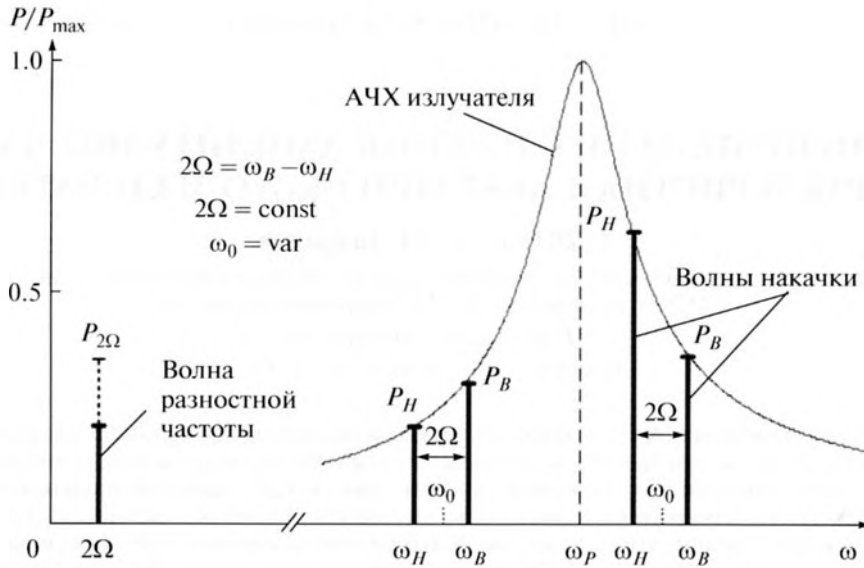


Рис. 1. Схема измерения АЧХ излучателя нелинейным методом.

[6] и ФЧХ, которые лишены перечисленных недостатков.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА

В основу метода положен контроль изменений амплитуды волны разностной частоты (ВРЧ), которая образуется в процессе нелинейного взаимодействия в среде распространения двух волн накачки с близкими частотами ω_H и ω_B . Разностная частота $(\omega_B - \omega_H) = 2\Omega$ остается постоянной в течение всего цикла измерений. При этом средняя частота накачки $\omega_0 = (\omega_B + \omega_H)/2$ непрерывно перестраивается в пределах диапазона рабочих частот излучателя со сколь угодно малым шагом, рис. 1. Перечисленные условия можно обеспечить, используя сигнал, получаемый при балансной модуляции высокочастотного колебания ω_0 низкочастотным сигналом Ω . Сигнал с балансной модуляцией представляет собой амплитудно-модулированный сигнал с коэффициентом амплитудной модуляции $m = \infty$ [7]. В этом случае разностная частота равна $(\omega_B - \omega_H) = 2\Omega$, и всегда выполняется условие $2\Omega \ll \omega_0$.

Для обобщенной модели нелинейного излучателя [8] амплитуда гармонической ВРЧ с частотой 2Ω определяется выражением

$$P_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega) = \frac{\varepsilon \Omega P_H P_B}{\rho_0 c_0^3} \times \exp(-\alpha_{2\Omega} x) P L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega) \times \cos[2\Omega t - k_{2\Omega} x + \varphi_B - \varphi_H + \varphi_{2\Omega}(r, x)], \quad (1)$$

где r и x — поперечная и продольная (осевая) координаты звукового поля; ε , ρ_0 , c_0 — параметр нелинейности, плотность и скорость звука среды; P_H и P_B — начальные ($x = 0$) амплитуды волн накачки; $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ — пространственный множитель, учитывающий нелинейную перекачку энергии из волн накачки в волну разностной частоты, дифракцию и диссипацию волн накачки, а также дифракцию ВРЧ; $\alpha_{2\Omega}$ — коэффициент поглощения ВРЧ; $k_{2\Omega} = 2\Omega/c_0$ — волновое число ВРЧ; φ_H и φ_B — начальные фазы волн накачки; $\varphi_{2\Omega}$ — дифракционный набег фазы ВРЧ.

Зафиксируем координаты точки наблюдения (r, x) и будем осуществлять перестройку средней частоты накачки ω_0 при соблюдении условия $2\Omega = \text{const}$. Перестройка частоты ω_0 сопровождается изменением амплитуд P_H и P_B , вызванным неравномерной АЧХ излучателя, работающего, как правило, в резонансном режиме, рис. 1. Амплитуда ВРЧ (1) пропорциональна произведению амплитуд исходных волн ($P_H \times P_B$), поэтому отмеченные изменения P_H и P_B при перестройке частоты ω_0 проявятся на измеренной зависимости $P_{2\Omega}(\omega_0)$.

Принцип действия и особенности метода проследим на примере монорезонансного излучателя, для которого частотная зависимость комплексного значения чувствительности запишется в виде [3]

$$\dot{S}_U(\omega) = \frac{\dot{P}(\omega, x=0)}{\dot{U}_{изл}(\omega)} = D_0 \left[\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2} \right]^{-1} \times \exp \left\{ i \arctg \left[Q \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Нормированную АЧХ чувствительности (2) излучателя $S_{Un}(\omega)$ представим отношением:

$$S_{Un}(\omega) = |\dot{S}_U(\omega)| / D_0 = 1 / \sqrt{1 + Q^2 (\omega/\omega_p - \omega_p/\omega)^2} \equiv S_{Ua}(\omega). \quad (3)$$

На практике всегда интересно знать характер изменения АЧХ в околорезонансной области частот, где выполняется условие

$$\omega_p \gg |\omega - \omega_p|. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) представим приближенным соотношением

$$S_{Ub}(\omega) = \left[\sqrt{1 + 4Q^2 (\omega/\omega_p - 1)^2} \right]^{-1} \approx S_{Ua}(\omega). \quad (5)$$

При практическом использовании пьезокерамического излучателя, в том числе при нагрузке на воду, добротность может принимать значения $Q = 5 \dots 50$. В этом случае различие между точным (3) и приближенным (5) выражениями АЧХ в полосе частот $\pm 25\%$ относительно резонансной частоты не превышает 17%. С приближением к резонансу, что соответствует более строгому выполнению неравенства (4), различия между зависимостями $S_{Ua}(\omega)$ и $S_{Ub}(\omega)$ сокращаются, стремясь к нулю, и слабо зависят от добротности.

Для упрощения получаемых решений используем приближенную запись АЧХ (5), тогда произведение амплитуд волн накачки в выражении (1) выразится через безразмерную переменную ω_0/ω_p и параметр ξ :

$$P_H P_B = \frac{D_0 U_H}{\sqrt{1 + 4Q^2 (\omega_H/\omega_p - 1)^2}} \frac{D_0 U_B}{\sqrt{1 + 4Q^2 (\omega_B/\omega_p - 1)^2}} = \frac{D_0^2 U_H U_B}{\sqrt{1 + 8Q^2 (\omega_0/\omega_p - 1)^2 + 2\xi^2 + [4Q^2 (\omega_0/\omega_p - 1)^2 - \xi^2]^2}} = D_{MH} D_{MB} D_0^2 U_H U_B, \quad (6)$$

где $\omega_H = (\omega_0 - \Omega)$; $\omega_B = (\omega_0 + \Omega)$; $D_H = P_H / D_0 U_H$; $D_B = P_B / D_0 U_B$; U_H и U_B – напряжения сигналов накачки на электрических зажимах излучателя; ξ – параметр измерительного сигнала, который соотносит ширину его спектра 2Ω с полосой пропускания излучателя $\Delta\omega_p$:

$$\xi \cong 2Q\Omega/\omega_p = 2\Omega/\Delta\omega_p,$$

характеризуя точность измерения АЧХ. Добротность излучателя выражена известной формулой: $Q = \omega_p/\Delta\omega_p$, где ω_p и $\Delta\omega_p$ – резонансная частота и полоса пропускания излучателя на уровне -3 дБ. Отметим, что параметр ξ в приведенной записи можно получить из выражения обобщенной частотной расстройки [9], записанной в виде

$$\xi = Q(\omega/\omega_p - \omega_p/\omega) \approx 2Q(\omega/\omega_p - 1).$$

Для этого достаточно в приближенное равенство, относящееся к области рабочих частот вблизи резонансной частоты излучателя $\omega \approx \omega_p$, подставить частоты измерительного сигнала $\omega = \omega_{B,H} = \omega_0 \pm \Omega$ при соблюдении условия $\omega_0 \approx \omega_p$. Для преемственности терминологии параметр ξ будем далее называть обобщенной частотной расстройкой сигнала.

Выражение (6) связывает АЧХ излучателя с частотной зависимостью амплитуды ВРЧ (1). В качестве аргумента частотной зависимости используем перестраиваемую среднюю частоту накачки $\omega \equiv \omega_0$. Рассмотрим эту связь для частотно-зависимого параметра D :

$$D(\omega_0/\omega_p) = P_H P_B / D_0^2 U_H U_B = D_{MH} D_{MB} = 1 / \sqrt{1 + 8Q^2 (\omega_0/\omega_p - 1)^2 + 2\xi^2 + [4Q^2 (\omega_0/\omega_p - 1)^2 - \xi^2]^2}. \quad (7)$$

При $\xi = 0$, что соответствует бигармоническому сигналу накачки с бесконечно малой шириной спектра $2\Omega \rightarrow 0$, получаем

$$D(\omega_0/\omega_p) = 1 / \left[1 + 4Q^2 (\omega_0/\omega_p - 1)^2 \right] = D_M^2 = S_{Un}^2(\omega_0/\omega_p). \quad (8)$$

В предельном случае $\xi \rightarrow 0$ функция $D(\omega_0/\omega_p)$ повторяет квадрат функции АЧХ излучателя, записанной в виде (5) при замене $\omega \rightarrow \omega_0$. Полученное

соотношение (7) позволяет рассчитать АЧХ излучателя, для чего достаточно извлечь квадратный корень из измеренной зависимости $D(\omega_0/\omega_p)$. Требование малой обобщенной частотной расстройки $|\xi| \ll 1$ достигается при условии $\Omega \ll \omega_p/2Q$.

Представим (7) так, чтобы было видно, что только при $\xi = 0$ зависимость $D(\omega_0/\omega_p)$ точно описывает квадрат функции АЧХ излучателя:

$$D(\omega_0/\omega_p) = 1/\sqrt{[1 + 4Q^2(\omega_0/\omega_p - 1)^2]^2 + 2\xi^2[1 - 4Q^2(\omega_0/\omega_p - 1)^2] + \xi^4}.$$

Вид зависимости $D(\omega_0/\omega_p)$ существенно зависит от величины обобщенной частотной расстройки ξ . При значениях $0 < |\xi| \leq 1$ эта характеристика имеет форму одногорбой кривой с максимумом на частоте $\omega \equiv \omega_p$:

$$D_{\max}(|\xi| \leq 1) = 1/(1 + \xi^2).$$

$$D_n(\omega_0/\omega_p) = D/D_{\max} = (1 + \xi^2)/\sqrt{[1 + 4Q^2(\omega_0/\omega_p - 1)^2]^2 + 2\xi^2[1 - 4Q^2(\omega_0/\omega_p - 1)^2] + \xi^4}. \quad (9)$$

На рис. 2 показаны рассчитанные характеристики (9) для $\xi = 0.01$, $\xi = 0.2$ и $\xi = 1$. Кривая 5 соответствует выражению (5). Изменение ξ равносильно изменению разностной частоты 2Ω . В случае $|\xi| = 1$ форма характеристики существенно отличается от АЧХ излучателя, принимая вид

$$D_n(\omega_0/\omega_p) = 1/\sqrt{1 + 4Q^4(\omega_0/\omega_p - 1)^4}.$$

При больших значениях обобщенной частотной расстройки ($\xi > 1$) у характеристики $D(\omega_0/\omega_p)$

С увеличением ξ вершина кривой стремится принять вид плоского участка, который достигает своего предельного размера при $|\xi| = 1$. Для $0 < |\xi| \leq 1$ нормированную характеристику $D(\omega_0/\omega_p)$ можно представить в виде

появляется провал в окрестности резонансной частоты $\omega = \omega_p$, который углубляется с ростом ξ , рис. 2. По обе стороны от провала на частотах

$$(\omega_0/\omega_p)_{1,2} = 1 \pm \sqrt{\xi^2 - 1}/2Q \quad (10)$$

имеют место максимумы

$$D_{\max} = 1/2\xi. \quad (11)$$

С учетом (11) для значений $\xi > 1$ характеристика принимает вид

$$D_n(\omega_0/\omega_p) = D/D_{\max} = \frac{2\xi}{\sqrt{[1 + 4Q^2(\omega_0/\omega_p - 1)^2]^2 + 2\xi^2[1 - 4Q^2(\omega_0/\omega_p - 1)^2] + \xi^4}}. \quad (12)$$

Максимумы нормированной характеристики $D_n(\omega_0/\omega_p)$ на частотах (10) равны единице. Это позволяет выразить глубину провала на частоте резонанса $\omega_0/\omega_p = 1$ через обобщенную частотную расстройку, рис. 3:

$$D_{n0}(\omega_0/\omega_p = 1) = 2\xi/(1 + \xi^2). \quad (13)$$

По известной величине $D_{n0} = D_n(\omega_0/\omega_p) = 1$, которую несложно измерить, по формуле (13) находим соответствующее значение ξ :

$$\xi = 1/D_{n0} + \sqrt{(1/D_{n0})^2 - 1}, \quad (14)$$

где $D_{n0} \leq 1$. По известной обобщенной частотной расстройке сигнала (14) можно определить добротность и полосу пропускания излучателя:

$$Q = \omega_p \xi / 2\Omega, \quad (15)$$

$$\Delta\omega = 2\Omega/\xi. \quad (16)$$

Таким образом, зная глубину провала характеристики $D_n(\omega_0/\omega_p)$, можно оценивать параметры АЧХ без построения самой характеристики.

Воспользуемся соотношениями (8) и (1) для придания выражению, описывающему АЧХ излучателя при условии $\xi \rightarrow 0$, вида

$$\begin{aligned} S_{U_n}(\omega_0/\omega_p) &\cong \sqrt{D_n(\omega_0/\omega_p)} = \\ &= \sqrt{\frac{U_{2\Omega}}{M_{2\Omega} U_H U_B D_0^2} \exp(\alpha_{2\Omega} x) \frac{\rho_0 c_0^3}{\varepsilon \Omega L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)}} = \\ &= \sqrt{\frac{P_{2\Omega}}{U_H U_B D_0^2} \exp(\alpha_{2\Omega} x) \frac{\rho_0 c_0^3}{\varepsilon \Omega L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь $M_{2\Omega} = U_{2\Omega}/P_{2\Omega}$ – чувствительность звукоприемника (гидрофона) на частоте 2Ω ; $U_{2\Omega}$ – амплитуда электрического напряжения на зажимах гидрофона, обусловленного звуковым давлением $P_{2\Omega}$ поля излучателя. Если координаты расположения гидрофона и напряжения сигналов накачки U_H , U_B сохранять неизменными в течение измерительного цикла, тогда АЧХ излучателя (17) будет определяться частотно-зависимыми множителями $P_{2\Omega}(\omega_0)$ и $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$. Остальные параметры в расчетном выражении остаются постоянными.

Зависимость амплитуды ВРЧ $P_{2\Omega}(\omega_0)$ от средней частоты накачки определяется экспериментально, пространственный множитель $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ рассчитывается по одной из моделей нелинейного излучателя. Заметим, что влияние частоты ω_0 на абсолютное значение $L_{2\Omega}$ незначительно и в диапазоне

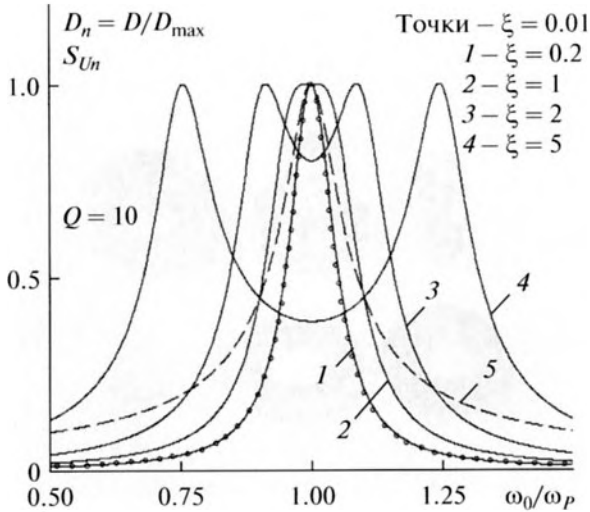


Рис. 2. Частотная зависимость параметров D_n (кривые 1–4) и S_{U_n} (кривая 5).

частот полосы пропускания излучателя не превышает 5%. Отмеченные особенности позволяют в первом приближении пренебречь влиянием функции $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ на вид АЧХ излучателя. В этом случае поведение характеристики $S_{U_n}(\omega_0/\omega_p)$ полностью определяется измеренной зависимостью $P_{2\Omega}(\omega_0)$.

Обратим внимание на возможность исключения влияния пространственного множителя на малых расстояниях x и укажем еще одну возможность определения параметров АЧХ по измеренной зависимости $D_n(\omega_0/\omega_p) \sim P_{2\Omega}(\omega_0)$. Взаимное пересечение кривых $S_{U_n}(\omega_0/\omega_p)$ и $D_n(\omega_0/\omega_p)$ на рис. 2 позволяет оценить полосу пропускания АЧХ по любому произвольно взятому уровню $1/A$ относительно единичного максимума. Приравняв правые части выражений (5) и (9) к величине $1/A$ ($A \geq 1$), получим границы соответствующей полосы частот:

$$(\omega_0/\omega_p)_{1,2} = 1 \mp \sqrt{A^2 - 1}/2Q. \quad (18)$$

Такую же полосу частот на уровне $1/A$ имеет характеристика $P_{2\Omega}(\omega_0)$, измеренная при $\xi \leq 1$. Здесь частотная обобщенная расстройка равна

$$\xi = \sqrt{4 + A^2} - 2. \quad (19)$$

Выражение (19) справедливо для значений $A \leq \sqrt{5}$. Например, стандартному уровню $1/A = 1/\sqrt{2}$ соответствует величина $\xi = \sqrt{6} - 2 \approx 0.67$, тогда как полосу пропускания по уровню $1/A = 0.5$ следует находить из кривой $P_{2\Omega}(\omega_0)$, которая измерена при значении $\xi \approx 0.91$.

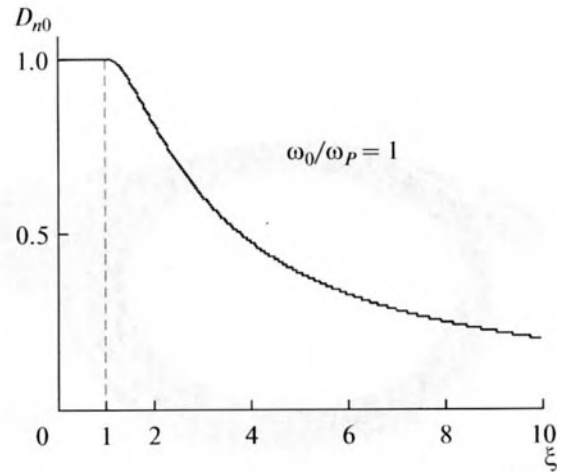


Рис. 3. Зависимость глубины провала характеристики $D_n(\omega_0/\omega_p)$ от частотной расстройки ξ .

Для значений $\xi \geq 1$ вместо (9) используем выражение (12). Здесь величина ξ связана с уровнем A соотношением

$$\xi = \sqrt{3A^2 - 2 - 2\sqrt{2A^4 - 3A^2 + 1}}, \quad (20)$$

которое справедливо при $A \geq \sqrt{5}$. По глубине провала измеренной зависимости $P_{2\Omega}(\omega_0)$ на частоте резонанса рассчитывается из формулы (13) величина ξ . После этого по формулам (18)–(20) находим соответствующий уровень A и далее – соответствующую ему полосу пропускания излучателя.

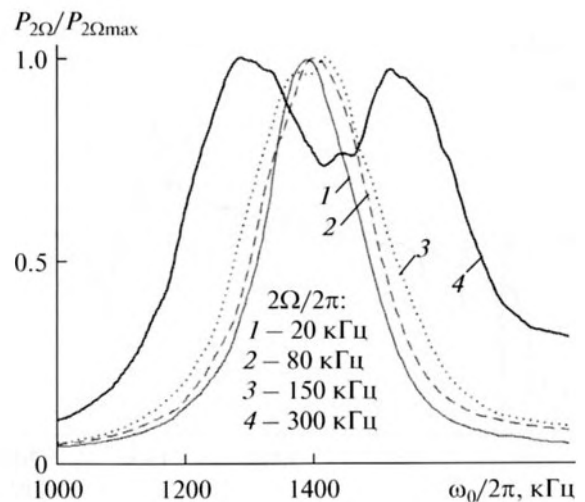


Рис. 4. Частотная зависимость амплитуды волны разностной частоты (эксперимент).

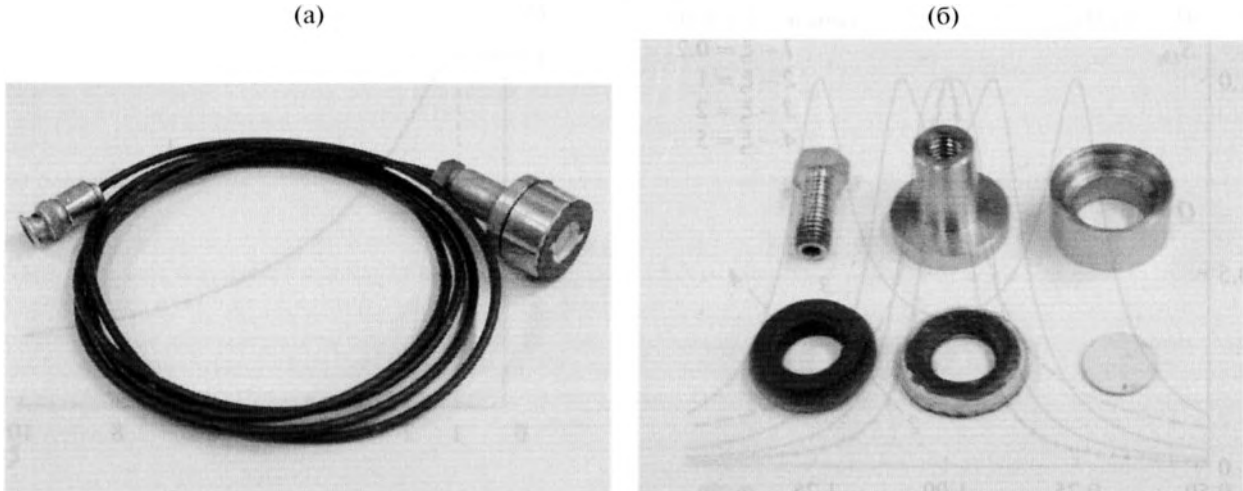


Рис. 5. (а) Внешний вид излучателя и (б) элементы его конструкции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА

На рис. 4 показаны измеренные зависимости амплитуды ВРЧ от средней частоты накачки при разных значениях 2Ω , которые подтверждают закономерности, наблюдаемые на рассчитанных кривых $D_n(\omega_0/\omega_p)$, рис. 2. Условия проводившегося эксперимента соответствуют поршневому излучателю круглой формы диаметром рабочей поверхности $2a = 18$ мм и резонансной частотой $\omega_p/2\pi = 1.4$ МГц. Расстояние до миниатюрного звукоприемника ВРЧ, который располагался на акустической оси пучка, составило $x = 50$ см. Подводимое к излучателю электрическое напряжение $U_H = U_B = 20$ В соответствует режиму малых

амплитуд. Измерения проводились в импульсном режиме излучения на частотах $2\Omega/2\pi = 20, 80, 150$ и 300 кГц.

Конструкция излучателя содержит круглую пьезопластину (ЦТС-19), эбонитовую шайбу, металлический корпус в форме цилиндра, к которому приклеена эбонитовая шайба, и фланец с кабельным вводом, рис. 5. Пьезопластина приклеена по краю к эбонитовой шайбе, служащей для электрической и механической изоляции от корпуса. Тильная поверхность пьезопластины (внутри корпуса) нагружена на воздух. Измеренные в воде длина области дифракции Френеля (ближняя область поля) и чувствительность в режиме излучения, приведенная к рабочей поверхности излучателя, составили на частоте ω_p соответственно $l_d \approx 85$ мм и $S_U = 8080$ Па/В. Чувствительность измерена в ближней области поля методом самовзаимности [4].

Одной из обязательных процедур, предваряющих исследования, предусмотрен обмер частотного спектра радиальных мод колебаний пьезокерамической пластины, входящей в конструкцию излучателя. Для этого в полосе частот, включающей разностные частоты и частоты накачки, измерялись частотные зависимости модуля электрической проводимости пьезопластины и изготовленного из нее преобразователя, рис. 6. В нашем излучателе частоты радиальных резонансов 114 и 260 кГц попадают в область частот ВРЧ (2Ω). Для предотвращения грубых ошибок при проведении измерений АЧХ эти частоты заранее исключались из области возможных значений частоты ВРЧ. Источником ошибки здесь является неконтролируемая интерференция двух волн равных частот 2Ω , одновременно распространяющихся вдоль акустической оси излучателя. Одной из этих волн является ВРЧ – информативная вол-

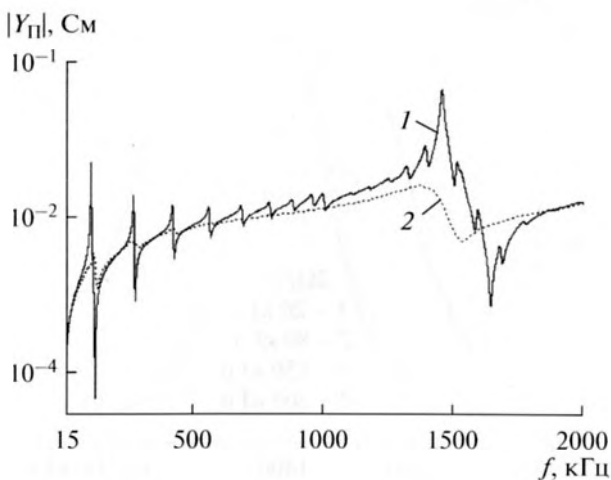


Рис. 6. Частотные зависимости модуля электрической проводимости пьезопластины в воздухе (кривая 1) и изготовленного из нее излучателя с нагрузкой на воду (кривая 2).

на нашего метода, она генерируется накачкой в воде. Появление второй волны обязано излучению на частоте радиального резонанса паразитного сигнала с частотой 2Ω , присутствующего в электрическом излучающем тракте измерительной установки. Из-за невозможности предсказать разность фаз между этими двумя волнами и амплитуду паразитного излучения, что не позволяет оценить и учесть результат интерференции, частоты радиальных резонансов не используются в измерениях АЧХ.

Для регистрации ВРЧ использовался звукоприемник, изготовленный из тонкостенного пьезокерамического цилиндра размерами 3×3 мм, который крепился на эластичном подвесе к щупу в виде тонкой металлической трубки. Постоянство частоты ВРЧ ($\omega_B - \omega_H = 2\Omega = \text{const}$) на протяжении всего цикла измерения АЧХ излучателя сохраняет неизменной дифракционную поправку чувствительности звукоприемника, обусловленную его конечными волновыми размерами. Благодаря этому в нашем методе конечное значение дифракционной поправки чувствительности звукоприемника не влияет на форму измеряемой АЧХ. Отмеченная особенность является важным преимуществом разработанного метода, поскольку обеспечивает высокую точность измерения характеристики в широком диапазоне частот. Если изменить разностную частоту, после чего сохранять ее значение в течение всего измерительного цикла, как того требует метод, то и в этом случае изменившаяся дифракционная поправка чувствительности звукоприемника не повлияет на точность измерения АЧХ.

Для сравнения, в традиционных методах, где звукоприемник регистрирует волны на частотах из диапазона определения АЧХ, дифракционная поправка чувствительности приемника имеет на каждой частоте свое значение. Определить зависимость дифракционной поправки от частоты и исключить ее из измеренной АЧХ бывает весьма проблематично, поскольку точный расчет дифракционной поправки в полосе частот можно выполнить лишь в некоторых частных случаях — для звукоприемника в форме круглого диска, жесткой сферы и некоторых других. Учесть в расчете реальную форму и импеданс материала имеющегося звукоприемника не представляется возможным. Не меньшие трудности сопровождают и попытки измерения частотной зависимости дифракционной поправки звукоприемника.

Процедура нахождения акустической оси излучателя в эксперименте свелась к совмещению направления излучения с траекторией перемещения вдоль бассейна звукоприемника, установленного на подвижной тележке. Горизонтальная ориентация акустической оси излучателя в направлении продольной координаты бассейна предпочтительна для исследования структуры акустического поля и поз-

воляет увеличить помехоустойчивость измерений благодаря ослаблению волн, многократно отраженных от стен бассейна и границы вода/воздух. “Привязка” акустической оси излучателя к траектории движения звукоприемника проводится в два этапа: вначале с траекторией движения приемника совмещается проекция акустической оси излучателя на горизонтальную плоскость, после чего аналогичная процедура проводится с проекцией акустической оси на вертикальную плоскость. Критерием настройки в каждом случае является получение максимума акустического сигнала на выходе звукоприемника, который последовательно помещают в нескольких точках дальнего поля излучателя. Все описанные операции проводятся, используя механизмы поворота излучателя (горизонтальная и вертикальная плоскости) и устройство линейного перемещения звукоприемника вдоль вертикальной и поперечной горизонтальной координат.

Кривая 4 на рис. 4 имеет провал на частоте резонанса излучателя, который характерен для больших значений расстройки, $\xi > 1$. Начальный этап формирования провала можно видеть на кривой 3. По кривой 4 проводилась оценка параметров АЧХ излучателя, используя соотношения (15) и (16). Из кривой получаем $D_{n0} \approx 0.72$, что соответствует $\xi \approx 2.35$. В результате добротность и полоса пропускания излучателя по уровню -3 дБ оказались равными $Q = 10.9$ и $\Delta\omega/2\pi = 127.7$ кГц.

Погрешность рассматриваемого метода включает несколько составляющих. Среди основных источников ошибки отметим конечную величину обобщенной частотной расстройки ξ ; неточное соответствие рассчитываемого множителя $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ реальному пространственному распределению амплитуды ВРЧ излучателя; нелинейные эффекты, приводящие к изменению зависимости $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ с ростом амплитуды накачки; погрешности измерения напряжений на излучателе и приемнике; несоответствие табличных параметров среды реальным значениям и др.

Погрешность из-за конечной величины обобщенной частотной расстройки сигнала ξ при неправильном выборе ее величины может оказаться определяющей:

$$\delta k_1(\omega_0/\omega_p) = \left| S_{Un}(\omega_0/\omega_p) - \sqrt{D_n(\omega_0/\omega_p)} \right| / S_{Un}(\omega_0/\omega_p).$$

Здесь $S_{Un}(\omega_0/\omega_p)$ — выражение АЧХ излучателя (3); $D_n(\omega_0/\omega_p)$ — расчетное выражение АЧХ без учета пространственного множителя согласно (9). На частоте резонанса ошибка из-за конечного значения расстройки равна нулю, рис. 7. Наибольшие значения δk_1 соответствуют частотам

$$(\omega_0/\omega_p)_{1,2} = 1 \pm \sqrt{\xi^2 + 3/2Q}. \quad (21)$$

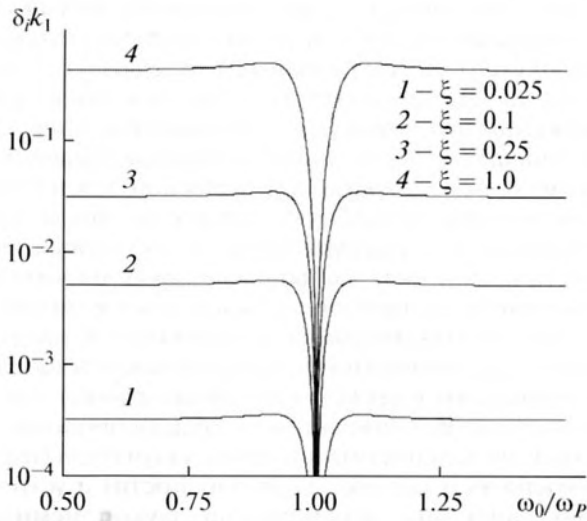


Рис. 7. Зависимости ошибки, вызванной конечной обобщенной расстройкой, от средней частоты накачки.

Максимальное значение этой ошибки на частотах (21) равно

$$\delta k_{1\max} = \left| \sqrt{(1 + \xi^2)\sqrt{4 + \xi^2/2}} - 1 \right|. \quad (22)$$

Согласно (22), систематическую ошибку метода можно снизить до требуемого уровня, уменьшая величину ξ . В эксперименте разностной частоте $2\Omega/2\pi = 60$ кГц ($\xi = 0.386$) соответствует ошибка $\delta k_{1\max} = 8.2\%$. Снижая разностную частоту до 15 кГц, можно наибольшее значение ошибки измерений АЧХ данным методом сократить до 0.52%.

Частотно-зависимая дифракционная поправка, которая в традиционных методах измерения АЧХ представляет наибольшую трудность для учета из-за сложности расчета и измерений, в нашем методе остается постоянной. Поэтому на вид измеряемой АЧХ, как отмечено выше, она не влияет.

Совместное влияние амплитудно-зависимых эффектов в излучателе (разогрев пьезоэлемента) и нелинейных процессов в среде распространения волн исследовалось экспериментально по изменению зависимости $P_{2\Omega}(\omega_0)$, рис. 8. Измерения выполнялись при амплитудах напряжений сигнала накачки $U_H = U_B = 10, 20, 30$ и 40 В на разных удалениях от излучателя. При увеличении амплитуд излучаемых волн отмечена тенденция к снижению резонансной частоты, которая не превысила 1.5%, и расширению полосы пропускания излучателя. Последний фактор обусловлен нелинейным ростом внутренних потерь при больших амплитудах колебаний пьезоэлемента. Поскольку режим больших амплитуд является штатным для многих акустических устройств, то измерение АЧХ можно рекомендовать проводить при номи-

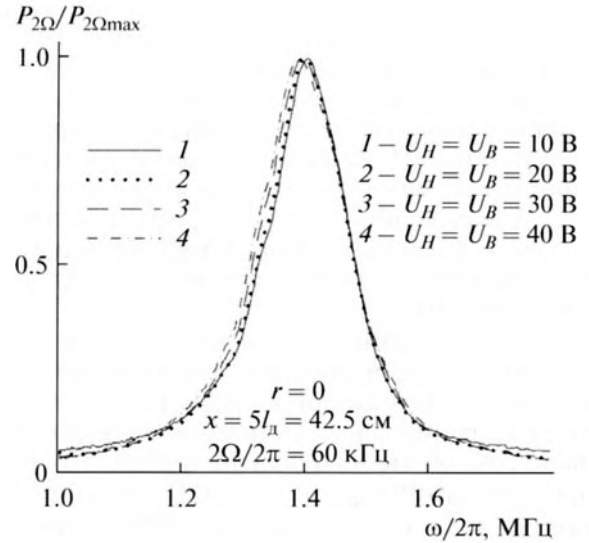


Рис. 8. Частотная зависимость амплитуды ВРЧ при разных амплитудах волны накачки.

нальной излучаемой мощности с целью выявления и учета отмеченных изменений.

Расстояния между излучателем и звукоприемником, расположенным на акустической оси пучка, выбраны из условия $x \geq l_d$, где l_d — измеренная длина области дифракции волн накачки: $x = l_d = 8.5$ см, $x = 2l_d = 17$ см и $x = 5l_d = 42.5$ см. При измерениях на указанных расстояниях степень и характер влияния на АЧХ излучателя амплитудно-зависимых эффектов практически не менялись.

Влияние на результат измерения АЧХ со стороны дифракционных и диссипативных частотно-зависимых процессов отнесено на счет пространственного множителя в выражении (17). При расчете $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ использовалась теоретическая модель нелинейного излучателя в режиме заданной накачки [8], основанная на решении уравнения Хохлова—Заболотской—Кузнецова. Как показали расчеты, влияние $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$ на измеряемую характеристику незначительно, рис. 9.

Ошибка из-за частотной зависимости пространственного множителя $L_{2\Omega}(\omega)$ оценивалась для разных расстояний по формуле

$$\delta k_2(\omega) = \frac{|L_{2\Omega}(r = 0, x, \omega_p) - L_{2\Omega}(r = 0, x, \omega)|}{L_{2\Omega}(r = 0, x, \omega_p)}.$$

Показано, что эта погрешность растет с удалением от резонансной частоты и при увеличении расстояния до излучателя. Монотонное изменение и пологий наклон зависимости $\delta k_2(\omega)$ не привели к сколько-нибудь существенному влиянию этой ошибки на АЧХ в окрестностях резонанса.

Из физических соображений следует, что влиянием пространственного множителя $L_{2\Omega}(r, x, \omega_0, \Omega)$

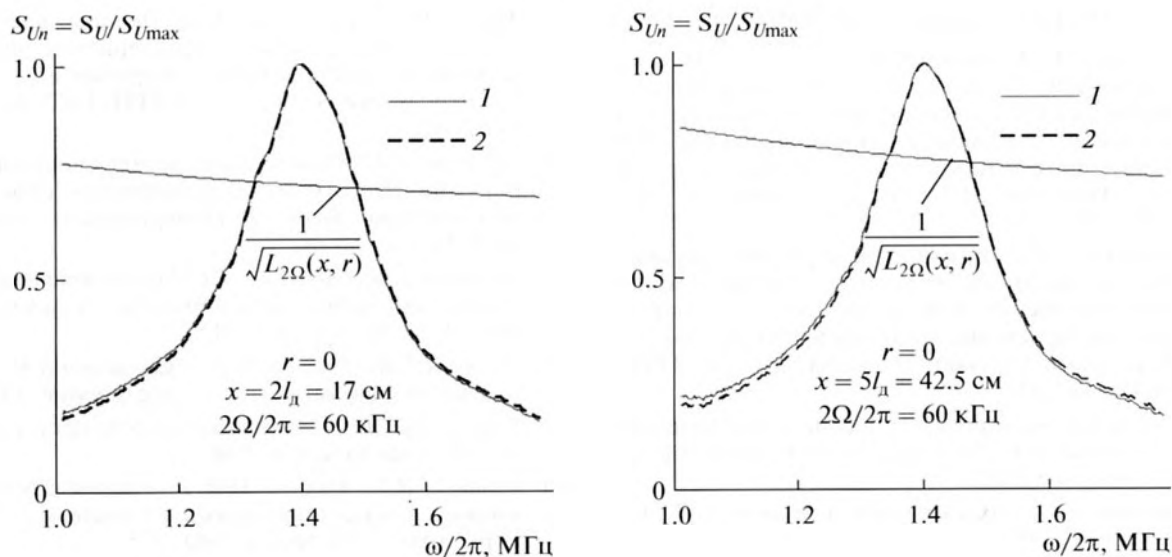


Рис. 9. АЧХ излучателя с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) множителя $L_{2\Omega}(r, x)$, соответствующие разным расстояниям x на оси пучка.

на результаты измерений АЧХ можно пренебречь при $x \rightarrow 0$, когда частотно-зависимые процессы дифракции и диссипации еще не успели проявиться. Однако выполнение этого условия на практике сдерживается рядом объективно существующих ограничений. Одним из них является низкий уровень амплитуды ВРЧ вблизи излучателя из-за накопительного характера формирования этой волны. С другой стороны, на малых расстояниях не следует пренебрегать влиянием “паразитного” излучения сигнала разностной частоты, образовавшегося из-за нелинейности электрического тракта, уровень которого вблизи источника может быть сопоставим с амплитудой генерируемой в среде ВРЧ.

Наряду с излучением паразитного электрического сигнала разностной частоты вблизи излучателя может проявиться эффект прямого излучения комбинационных частот излучателем, который совершает колебания конечной амплитуды на частотах накачки [10]. Поэтому выбор расстояния размещения звукоприемника является результатом компромисса между уровнем амплитуды генерируемой в среде ВРЧ и степенью мешающего влияния сопутствующего излучения этой частоты. Как показывает опыт, хорошее совпадение расчета и эксперимента характерно для дальней области поля излучателя в приосевой области пучка: здесь амплитуда ВРЧ монотонно и достаточно медленно изменяется с расстоянием, не подвержена влиянию осцилляций волн накачки, позволяя наиболее просто обеспечить нужные настройки в эксперименте. Именно такие условия измерений реализованы в эксперименте и рекомендованы для использования.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод измерения АЧХ излучателя благодаря использованию физических принципов нелинейной акустики обладает существенными преимуществами перед другими известными методами:

1) исключена необходимость использования звукоприемника с известной частотной характеристикой чувствительности в полосе измеряемых частот. Благодаря этому измерения АЧХ стали доступны широкому кругу потребителей, значительно снижена их стоимость;

2) упрощена аппаратная реализация метода, использующая поточечное измерение амплитуды ВРЧ при сканировании средней частотой накачки ω_0 и сохранении неизменным в течение измерительного цикла расстояния между излучателем и приемником, разностной частоты 2Ω и подводимых к излучателю напряжений U_H, U_B . Это позволило автоматизировать измерения, исключив участие оператора;

3) появилась возможность оценки параметров АЧХ излучателя (добротность, полоса пропускания) без нахождения самой характеристики. Стали менее критичными требования к условиям измерений (приведенный к входу приемного тракта установки шум, диапазон расстояний между излучателем и приемником, длительность излучаемого радиоимпульса сигнала накачки и др.), что упрощает контроль излучателя в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дологов С.А., Каевицер В.И., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Саворский А.В. Применение низкочастотного эхолота-профилографа с многоэлементной излучающей антенной и широкополосным ЛЧМ зондирующим сигналом для исследования морского дна // Известия ТРТУ. Таганрог. 2004. № 5(40). С. 273–279.
2. Тимошенко В.Г. Разрушение структуры шумоподобного сигнала при его распространении в многолучевом канале при фиксированном положении излучателя и приемника / Сб. трудов XV сессии Российского акустического общества. Т. 2. М.: ГЕОС, 2004. С. 144–147.
3. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник. Под ред. Богородского В.В. Л.: Судостроение, 1983.
4. Колесников А.Е. Акустические измерения. Л.: Судостроение, 1983.
5. Гитис Ю.А., Степанов М.А. Экспериментальное исследование фазовых характеристик чувствительности измерительных гидрофонов // Прикладная акустика. Таганрог: ТРТИ, 1987. Вып. XII. С. 92–98.
6. Гаврилов А.М. Нелинейный метод измерения амплитудно-частотной характеристики приемника акустических волн // Измерительная техника. 2014. № 6. С. 58–62.
7. Гаврилов А.М., Ситников Р.О. Измерение геометрической дисперсии в звуковом пучке // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 641–647.
8. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.
9. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
10. Куницын В.Е., Руденко О.В. Генерация второй гармоники в поле поршневого излучателя // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 4. С. 549–555.