

Особенности измерений акустических характеристик параметрических излучающих антенн

В. Б. ЖЕЛЕЗНЫЙ, Д. Б. ОСТРОВСКИЙ

ОАО «Концерн «Океанприбор», С.-Петербург, Россия, e-mail: mfp@mail.wplus.net

Рассмотрены два фактора, которые следует учитывать при измерениях характеристик параметрических излучающих антенн: нелинейные искажения в приемном измерительном тракте при одновременном приеме сильных сигналов на частотах сигнала накачки и слабого сигнала разностной частоты; необходимость измерений в зоне нелинейного взаимодействия волн накачки. Предложена методика вычисления поправки для пересчета измеренного акустического давления в дальнюю зону.

Ключевые слова: нелинейная акустика, параметрические излучающие антенны, акустические характеристики.

The two factors to be taken into account at measurements of characteristics of parametrical transmitting arrays, are considered. The first factor is the nonlinear distortions in a receiving measuring circuit at simultaneous reception of the strong pumping signal and a weak difference frequency signal. The second factor is the measurements in a zone of nonlinear interaction of pumping waves. The procedure of calculation of correction to recalculate the measured acoustic pressure into distant zone is suggested.

Key words: nonlinear acoustics, parametric transmitting arrays, acoustic characteristics.

В гидроакустических средствах различного назначения широко используют параметрические излучающие антенны (ПИА). Их можно применять в качестве измерительных устройств характеристик акустических приборов [1—3]. В отличие от акустических антенн традиционного типа ПИА позволяют формировать узкие диаграммы направленности (ДН) с малым по волновым размерам раскрытием; они имеют постоянную форму главного лепестка и ДН в широком частотном диапазоне, нерезонансный характер амплитудно-частотной характеристики акустического давления на разностных частотах, очень низкий уровень боковых лепестков. Однако ПИА как акустическая антенна отличается низкой энергетической эффективностью, которая характеризуется коэффициентом преобразования давления сигнала накачки в давление сигнала разностной частоты. Если давления обозначить p_{f1} , p_{f2} , p_F на частотах соответственно накачки f_1 , f_2 и разностной $F = |f_1 - f_2|$, то коэффициент преобразования $\zeta = p_F / \sqrt{p_{f1} p_{f2}}$ в ПИА составляет доли и единицы процентов [1, 4, 5].

В соответствии с принятыми методами [6] измерения акустических характеристик антенн должны выполняться на расстояниях между излучателем и приемником измерительной схемы $R > 2D^2/\lambda$ (D — наибольший размер излучателя, λ — длина волны), т. е. в зоне сформировавшейся сферической волны или в дальней зоне. Такой подход для ПИА оказался неприемлемым, поскольку формирование поля разностной частоты F происходит в самой среде распространения — в области взаимодействия первичных волн накачки ПИА, размер которой по оценкам, представленным в [1], может составлять от половины до нескольких единиц длин зон поглощения сигналов на частоте накачки. Так, при использовании в ПИА частот накачки 95 и 105 кГц, формировании акустического сигнала на разностной частоте 10 кГц при выборе $D \approx 100$ м (в морской воде) условие $R > 2D^2/\lambda$ [6]

будет для ПИА выполняться на расстояниях свыше 130 км, что означает невозможность переноса методов измерений параметров традиционных антенн на ПИА. Фактические измерения характеристик ПИА выполняют в ограниченных по размерам водоемах — опытовых бассейнах и полигонах, размеры измерительных баз которых обычно значительно меньше длины зоны затухания на частотах накачки. Поэтому возникают специфические проблемы, не характерные для измерений параметров антенн традиционного типа, а именно: необходимость контроля нелинейных искажений приемного измерительного тракта* и учета поправок количественных характеристик ПИА, связанных с проведением измерений в зоне ее формирования.

Контроль нелинейных искажений приемного измерительного тракта. При измерениях характеристик в зоне формирования ПИА на вход приемного измерительного тракта поступает трехчастотный сигнал акустического давления p_F , p_{f1} , p_{f2} , причем $p_{f1} \approx p_{f2}$, $p_F \ll p_{f1, 2}$. Поскольку измерения выполняют на сравнительно небольших расстояниях, поглощением сигналов обычно пренебрегают [6].

Задачи измерений — определить уровни давлений всех сигналов, приходящих в точку приема. Типовой приемный измерительный тракт включает последовательно соединенные широкополосные гидрофон и предварительный усилитель, за которыми следуют соответствующий полосовой фильтр и регистрирующий прибор. Поскольку первичные элементы приемного тракта содержат нелинейные элементы, например предварительный усилитель, то на вход фильтра поступают не только сигналы из воды на частотах F , f_1 , f_2 , но также их гармоники и сигналы комбинационных частот:

* Аналогичные проблемы наблюдаются при работе в режиме параметрического излучения с отраженным сигналом (см., например [7]).

$nF, nf_{1,2} (n = 2, 3, \dots), f_{\Sigma} = f_1 + f_2$. Чтобы исключить нелинейные искажения при одновременном приеме сигналов накачки и разностной частоты, при измерениях акустического давления динамический диапазон измерительного тракта должен удовлетворять условию

$$\eta_{\max} \geq \beta \cdot \max [p_{f1}, p_{f2}] / p_F \approx \beta / \zeta, \quad (1)$$

где $\beta > 1$ — коэффициент, определяющий уровень превышения полезного сигнала разностной частоты над сигналами нелинейных искажений и шумов приемного тракта, необходимый для проведения измерений с заданной точностью. На практике принимают $\beta \geq 3$ (при допустимой систематической инструментальной погрешности приемного тракта $\delta < 34\%$) или $\beta \geq 10$ при $\delta < 10\%$. Если $\zeta = 0,01$ (1%), то с учетом пик-фактора 6 дБ (в результате суммирования давлений частот накачки) динамический диапазон приемного тракта должен быть $\eta_{\max} = 56$ дБ при $\beta = 3,3$ и 66 дБ при $\beta = 10$.

Сформулируем требования, предъявляемые к динамическому диапазону линейной части измерительного тракта при измерении ДН на разностной частоте, которую обозначим $R_F(\theta)$, где θ — угол. Тракт должен без искажений одновременно обрабатывать сигналы $p_F(\theta), p_{f1}, p_{f2}(\theta)$. По определению $p_F(\theta) = p_F(\theta_{\max}) R_F(\theta)$, аналогично $p_{f1}, p_{f2}(\theta) = p_{f1}, p_{f2}(\theta_{\max}) R_{f1}, R_{f2}(\theta)$. Представим давления в виде

$$p_F(\theta) = \zeta \sqrt{p_{f1}(\theta_{\max}) p_{f2}(\theta_{\max})} R(\theta) \approx \zeta p_f(\theta_{\max}) R(\theta);$$

$$p_{f1}, p_{f2}(\theta) \approx p_f(\theta_{\max}) R_{f1}, R_{f2}(\theta).$$

Тогда динамический диапазон для измерений ДН в направлении θ с учетом коэффициента β должен быть

$$\eta(\theta) > \beta \cdot \max [R_{f1}(\theta) R_{f2}(\theta)] / [\zeta R_F(\theta)]. \quad (2)$$

Если сопоставить требования к динамическим диапазонам измерительного тракта по (1), (2), то в случае измерений ДН на разностной частоте динамический диапазон необходимо значительно расширить. Для численных оценок воспользуемся приближенной формулой [4, 5, 8]: $R_F(\theta) \approx$

$\approx R_{f1}(\theta) R_{f2}(\theta)$ или $R_F(\theta) \approx R_f^2(\theta)$, откуда следует, что ДН на разностной частоте, выраженная в децибелах, в два раза уже ДН на средней частоте сигнала накачки. Пусть $R_f(\theta) = -30$ дБ, тогда при $\beta = 3,3, \zeta = 0,01$ (–40 дБ) получим $\eta(\theta) = 116$ дБ. Измерительные тракты с таким динамическим диапазоном требуют специальной разработки, так как большинство современных измерительных приборов имеют динамический диапазон не более 60–80 дБ.

В структуре приемного измерительного тракта требования по динамическому диапазону, в основном, относятся к предварительному усилителю, поскольку динамический диапазон гидрофонов обычно превышает 100 дБ [9]. Давление p_F пропорционально произведению $p_{f1} p_{f2}$ [1, 8], поэтому для фиксации слабых сигналов разностной частоты необходимо увеличивать сигналы накачки, но при этом не перегружая приемный усилитель. Эффекта подавления сигналов $p_{f1,2}$ на входе приемного тракта можно добиться, используя метод

акустического фильтра [5, 9]. Идея метода заключается в измерениях, проводимых не одиночным гидрофоном, а направленной акустической антенной. При ширине главного лепестка ДН такой антенны на разностной частоте $\Delta\theta(F)$ и на средней частоте сигнала накачки $\Delta\theta(f)$ справедливо соотношение

$$\Delta\theta(F) / \Delta\theta(f) \geq f / F. \quad (3)$$

Измерения выполняют, ориентируя минимум ДН приемной антенны по частоте сигнала накачки на ПИА. При этом, как следует из (3), в направлении указанного минимума по f может отсутствовать минимум по F .

Простейшей направленной акустической антенной является диполь, который при расстоянии $d = \lambda/2$ между элементами формирует максимум в направлении 0 и 180°, а минимум в направлениях 90 и 270° (рис. 1). На рис. 1 представлены ДН, формируемые диполем при различных расстояниях d между элементами: $R_f(\theta)$ — верхний ряд, $R_F(\theta)$ — нижний ряд, λ — длина волны на средней частоте сигнала накачки. При $d = \lambda/2$ на частоте f формируются два максимума и между ними два минимума; при этом ДН по F практически круговая. При увеличении d в ДН $R_f(\theta)$ появляются максимумы, равные основному.

Метод теоретически позволяет полностью подавить сигнал накачки на входе предварительного усилителя, в реальных условиях динамический диапазон измерительного тракта расширяется на 30–50 дБ. Для практической реализации метода акустического фильтра достаточно ориентировать диполь минимумом ДН на направление падения сигнала. При увеличении d максимумы $R_f(\theta)$ обостряются, при этом уровень ДН по F постепенно уменьшается в направлении минимума по f .

Если для измерения p_F использовать метод акустического фильтра, то ДН $R_F(\theta)$ измерительной системы необходимо предварительно определить традиционным методом [6], затем при работе в параметрическом режиме измеренное значение p_F разделить на $R_F(\theta)$, т. е. внести поправку, связанную с некоторым уменьшением уровня сигнала разностной частоты.

Расстояние между элементами диполя $d = \lambda/2$ реализовать затруднительно, так как на высоких частотах накачки

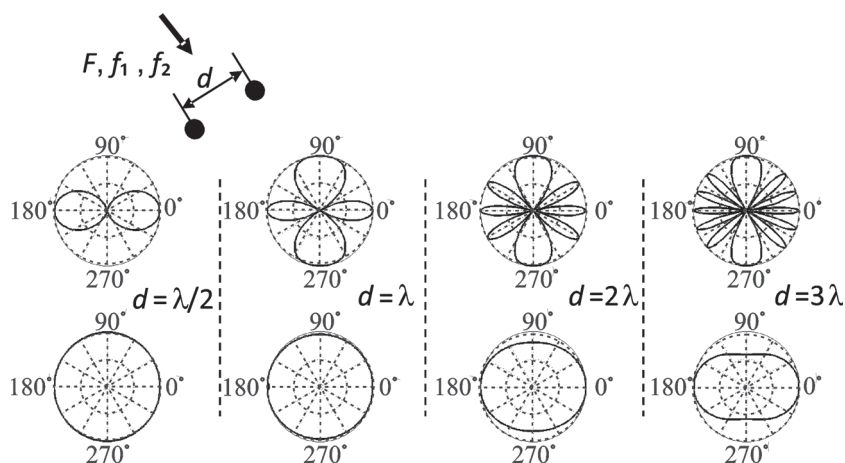


Рис. 1. Изменение диаграммы направленности диполя при разных расстояниях d между элементами на средней частоте сигнала накачки f (верхний ряд) и на разностной частоте F (нижний ряд)

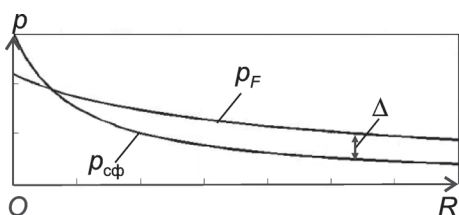


Рис. 2. Асимптотическое приближение функций $p_F(R)$ и $p_{сф}(R)$ при $R \rightarrow \infty$

размер гидрофона может быть сравним с $\lambda/2$. Целесообразно выбирать $d \approx (1...2)\lambda$, при этом необходимо вносить соответствующую поправку, учитывающую ДН диполя на разностной частоте, или располагать гидрофоны таким образом, чтобы длина проекции их центров на ось волнового вектора сигналов накачки была равна $\lambda/2$.

Разновидность метода акустического фильтра — использование узконаправленной антенны вместо диполя [10]. Основным недостатком метода с диполем является сложность настройки на минимум ДН по сигналу накачки, к достоинствам можно отнести простоту реализации. Недостатки метода с направленной антенной — сглаживание провала ДН по частоте накачки, поскольку $f_1 \neq f_2$, и влияние случайного разброса параметров элементов антенны [11], снижающих эффективность подавления сигналов накачки.

Измерения характеристик ПИА в зоне формирования. В соответствии с теоретическими представлениями о формировании ПИА нелинейное взаимодействие с образованием виртуальных источников НЧ-излучения продолжается до бесконечности [8, 12—14]. Как следует из модели ПИА по уравнению Хохлова—Заболотской—Кузнецова [1, 13], давление на разностной частоте в зависимости от расстояния имеет максимум при $R_{\max} = S\sqrt{f_1 f_2}/c \approx Sf/c$, где S — площадь источника сигнала накачки; c — скорость звука. В дальнейшем, при увеличении R зависимость $p_F(R)$ асимптотически приближается к функции $S_{сф}[-\alpha(F)R]/R$, описывающей распространение сферически расходящейся волны [1] (S — константа, не зависящая от расстояния R ; α — частотно-зависимый коэффициент поглощения).

На рис. 2 представлены кривые $p_F(R)$, сферической волны $p_{сф}(R)$ и их разность $\Delta = |p_F(R) - p_{сф}(R)| \rightarrow 0$ при $R \rightarrow \infty$. В соответствии с моделью ПИА [13] давление на разностной частоте представляется в виде

$$p_F(R) = A_F \exp(-\alpha_F R) \varphi(R, \xi), \quad (4)$$

где A_F — коэффициент, не зависящий от расстояния R ; $\varphi(R, \xi)$ — интегральная функция от R и набора параметров ξ , связанного с частотами $f_{1,2}$, F , поглощением на частоте F и площадью источника S ;

$$p_F(R)|_{R \rightarrow \infty} \rightarrow A_{сф} \exp(-\alpha_F R)/R, \quad (5)$$

причем $A_{сф}$ называют давлением, приведенным к 1 м [6]. Сопоставление (4), (5) показывает, что $A_F \varphi(R, \xi) \rightarrow A_{сф}/R$ при $R \rightarrow \infty$.

Разность Δ является монотонной убывающей функцией и зависит от R , т. е. $\Delta = \Delta(R)$. Задав погрешность Δ , можно найти границу R_d дальней зоны для ПИА. Используя (4), (5), получим уравнение

$$\Delta_{отн} = \left| \frac{p_F(R) - p_{сф}(R)}{p_F(R)} \right| = \left| 1 - \frac{1}{R\varphi(R, \xi)} \right|_{R=R_d}. \quad (6)$$

Из (6) можно численно найти расстояние R_d и принять, что, начиная с него, волна на разностной частоте распространяется по сферическому закону с относительной погрешностью $\Delta_{отн}$; при уменьшении $\Delta_{отн}$ R_d возрастает.

Акустические измерения выполняют в опытовых бассейнах, рабочий размер которых составляет 10—50 м, или на полигонах, где дистанция между источником сигнала накачки и приемником может составлять 100—200 м. При увеличении дистанции на полигонах необходимо учитывать вертикальное распределение скорости звука, донную и поверхностную реверберации, а также поглощение на частотах $f_{1,2}$, F . Поскольку измерения приходится выполнять в ограниченных водоемах, т. е. в зоне формирования ПИА, предложены формулы для расчета «длины» ПИА, когда низкочастотное излучение можно считать сформировавшимся. В случае мо-

дели ПИА по Вестервельту [12] ширина ДН $\Delta\theta = 4\sqrt{\alpha_f c/(2\pi F)}$, где α_f — коэффициент поглощения на средней частоте сигнала накачки f . При этом ПИА интерпретируется как антен-

на бегущей волны (АБВ), ширина ДН которой $\Delta\theta = 2\sqrt{c/(FL)}$, где L — длина АБВ. Отсюда легко получить длину ПИА: $L_{ПИА} = \pi/(2\alpha_f)$. В [1, 14, 15] предлагается ограничить $L_{ПИА} = (1...5)/\alpha_f$, что по порядку величины совпадает с длиной ПИА по модели АБВ. Расчеты по этим формулам дают длину ПИА в зависимости от средней частоты сигнала накачки в пределах от 100—200 м до нескольких километров. При непосредственном вычислении по (6) получаем большее значение R_d . Таким образом, в реальных условиях ограниченного водоема измеренное давление на разностной частоте, приведенное к 1 м [6], оказывается ниже реального.

Определим поправку к измеренному давлению на разностной частоте в ограниченном водоеме. Пусть расстояние, на котором выполняются измерения, будет $R_{и}$. Преобразуем (4), (5) к виду

$$p_F(R) \exp(\alpha_F R)/\varphi(R, \xi) = A_F; p_{сф}(R) \exp(\alpha_F R)/R = A_{сф}. \quad (7)$$

При $R = R_d$ с погрешностью Δ имеем $A_F = A_{сф} = \text{const}(R)$. Если $R = R_{и} \ll R_d$, то левая часть первого уравнения в (7) становится зависимой от R и относительная поправка определится как

$$\mu = \left| \frac{p_F(R_{и})R_{и} \exp(\alpha_F R_{и}) - p_F(R_d)R_d \exp(\alpha_F R_d)}{p_F(R_d)R_d \exp(\alpha_F R_d)} \right|$$

или при $R_{и} \ll R_d$

$$\mu = \left| 1 - p_F(R_{и})R_{и} / [p_F(R_d)R_d \exp(\alpha_F R_d)] \right|. \quad (8)$$

В (8) давление p_F при вычисленном значении R_d и известном $R_{и}$ находят по (4) [1, 13]. Поправка μ зависит от $R_{и}$, при этом $\mu > 0$, как следует из [13] и рис. 2. Поэтому при определении приведенного к 1 м давления, развиваемого ПИА по дальнему полю, поправку следует прибавлять к измеренно-

му значению. Расчеты, выполненные по (8) с использованием модели [1, 13] для различных модификаций ПИА, показали, что поправка μ может составлять от нескольких до 40 дБ; уменьшается при увеличении измерительной базы; больше для узконаправленных антенн. Отметим, что при измерениях в любых водоемах должно выполняться условие $R_{\text{и}} > Sf/c$.

Заключение. При измерениях полевых характеристик параметрических излучающих антенн следует до выполнения экспериментов проверить динамический диапазон приемных измерительных трактов, так как при нелинейности последних регистрируемые данные не соответствуют истинным характеристикам, связанным с нелинейным взаимодействием волн в среде распространения. Нелинейность измерительных трактов также требуется контролировать при измерениях характеристик параметрических приемных антенн [1, 4, 13]. При оценке характеристик ПИА по дальнему полю необходимо учитывать поправки, связанные с выполнением измерений в зоне взаимодействия, что повысит точность прогнозирования параметров систем с использованием параметрических излучающих трактов.

Л и т е р а т у р а

1. Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1989.
2. Александров В. А., Железный В. Б., Островский Д. Б. О параметрических излучателях для океанографических исследований // Гидроакустичний журнал (НАН України). 2004. № 1. С. 49—53.
3. Гаврилов А. М. Нелинейный метод измерения амплитудно-частотной характеристики приемника акустических волн // Измерительная техника. 2014. № 6. С. 58—62.

4. Воронин В. А., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004.

5. Островский Д. Б. Введение в нелинейную гидроакустику. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.

6. Колесников А. Е. Акустические измерения. Л.: Судостроение, 1983.

7. Пат. 5790474 США. Active sonar for under-ice conditions / P. L. Feintuch. 1998.

8. Moffett M. B., Mellen R. H. Model for parametric acoustic sources // JASA. 1977. V. 61. N. 2. P. 325—337.

9. Ивлиев С. В. Оценка нелинейных характеристик гидрофонов // Судостроение за рубежом. 1985. № 2. С. 82—84.

10. Пат. 67370 РФ. Устройство для измерения характеристик параметрических излучающих антенн / С. А. Борисов, Д. Б. Островский // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 28.

11. Железный В. Б., Островский Д. Б. О совершенствовании схемы измерений характеристик параметрического излучателя // Судостроительная промышленность. Общие вопросы судостроения. Стандартизация и метрология. 1992. Вып. 13. С. 59—64.

12. Берктей Х. О. Некоторые явления в подводной акустике, связанные с волнами конечной амплитуды // Подводная акустика / Под ред. В. М. Алберса. М.: Мир, 1970. С. 325—346.

13. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.

14. Железный В. Б. Параметрическое взаимодействие на сферических и цилиндрических волнах // Прикладная акустика (Таганрог). 1985. Вып. XI. С. 23—26.

15. Moffett M. B., Mellen R. H. Effective length of parametric acoustic sources // JASA. 1981. V. 70. N. 5. P. 1424—1426.

Дата принятия 25.02.2015 г.

534.88:532.5

Пассивный метод обнаружения движущихся в воде целей

И. Ф. КАДЫКОВ

Специальное научно-производственное объединение «Элерон»,
Москва, Россия, e-mail: kadykov@ eleron.org

Рассмотрен новый пассивный метод охраны водных рубежей, который заключается в регистрации колебаний давления в поле неоднородной волны давления, возникающей при обтекании движущегося в воде тела. Особенностью волны как зоны локальных давлений является ее резкое ограничение в пространстве рядом с телом, что позволяет четко отслеживать зону изменений давлений.

Ключевые слова: водный рубеж, неоднородная волна давления.

A new solution of passive method of the water line verge protection based on registration of pressure fluctuations in the field of nonuniform wave, occurring at the flow about the moving body is considered. The feature of the wave as of the band of local pressures, is its sharp restriction in the space near the body, making possible to monitor the area pressure changes.

Key words: water line verge, inhomogeneous pressure wave.

Проблема охраны водных рубежей актуальна во всем мире, особенно она значима для водных рубежей атомных электростанций (АЭС). Рубежи АЭС — это внешняя система

водяного охлаждения реакторов, состоящая из прилегающего к станции водного бассейна, а также водоподводящего и водоотводящего каналов, по которым может произойти