АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 36 1990 Вып. 3

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.222

© 1990 г.

В. А. Андебура, Д. М. Донской, К. А. Наугольных, Ю. С. Степанов, А. М. Сутин

ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ МОЩНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Известно [1–3], что эффективность параметрических излучателей звука растет с увеличением их мощности. Введению параметрического режима в мощные акустические системы, как правило, мешает их собственная нелинейность (усилителей мощностси и электроакустических преобразователей), которая приводит к паразитному излучению на комбинационных частотах, маскирующему параметрический сигнал. Данная работа посвящена исследованию параметрического режима излучения мощной акустической системы, в которой для преодоления указанного недостатка производилось возбуждение отдельных групп преобразователей сигналами двух различных частот. При этом взаимодействие волн накачки происходило вне прожекторных зон, на достаточном удалении от излучателей.

В экспериментах на научно-исследовательском судне проводилось возбуждение половинок акустической антенны размерами 2×3 м² каждая. Максимальная акустическая мощность каждой половины составляла 12 кВт, излучаемые частоты находились в диапазоне 1,9÷3,9 кГц. Прием сигналов производился на другом судне на опускаемый приемник. Измерение уровня звукового поля и характеристики направленности антенны на разностной частоте проводились при расстоянии между судами около двух километров. Ширина характеристики направленности по уровню −3 дБ составила 7÷8° (рис. 1). Уровни звукового поля разностной частоты, приведенные к расстоянию 1 м и выраженные в децибелах относительно 1 мкПа·м, указаны в таблице.

Уровни параметрического излучения, измеренные на дистанции 2 км и пересчитанные к расстоянию 1 м

Частота	Расчетный уровень дБ/мкПа·м	Экспериментальный уровень дБ/мкПа·м
300	184	179±3
620	190	188±3
970	194	191±3

Характеристика направленности и уровни звукового поля близки к расчетным данным, полученным по модели Берктея [3]. Оценка уровней звукового поля разностной частоты вдоль оси излучателя проводилась без учета затухания по формуле

$$p_s = \frac{p_1 p_2 R_\Phi^2 \pi \varepsilon}{\lambda \rho_0 c^2 R}\left(\frac{\Omega}{\omega}\right)\ln\left(\frac{R\omega}{R_\Phi \Omega}\right),$$

где p_1 и p_2 – амплитуды звукового давления полей накачки на поверхностях излучателей, R_Φ – размер зоны Фраунгофера, R – расстояние до точки наблюдения, λ – средняя длина волны полей накачки, ω – средняя частота полей накачки, Ω – разностная частота, $\varepsilon \simeq 3{,}5$ – нелинейный параметр воды.

Реализованный режим параметрического излучения гидроакустической системы позволил существенно расширить ее функциональные возможности. В частности, он использовался для исследования распространения широкополосных сигналов в условиях глубокого океана (5 км) в волноводном канале летнего типа. Для этого на одну часть антенны подавался возбужденный сигнал частотой 2,9 кГц, а на другую часть – частотно-модулированный сигнал с девиацией частоты от 3,1 до 3,9 кГц. Указанный режим обеспечивал излучение частотно-модулированного сигнала разностной частоты с девиацией от 200 до 1000 Гц. Прием осуществлялся на расстоянии 180 км в начале третей зоны конвергенции, где уровень сигнала состав-

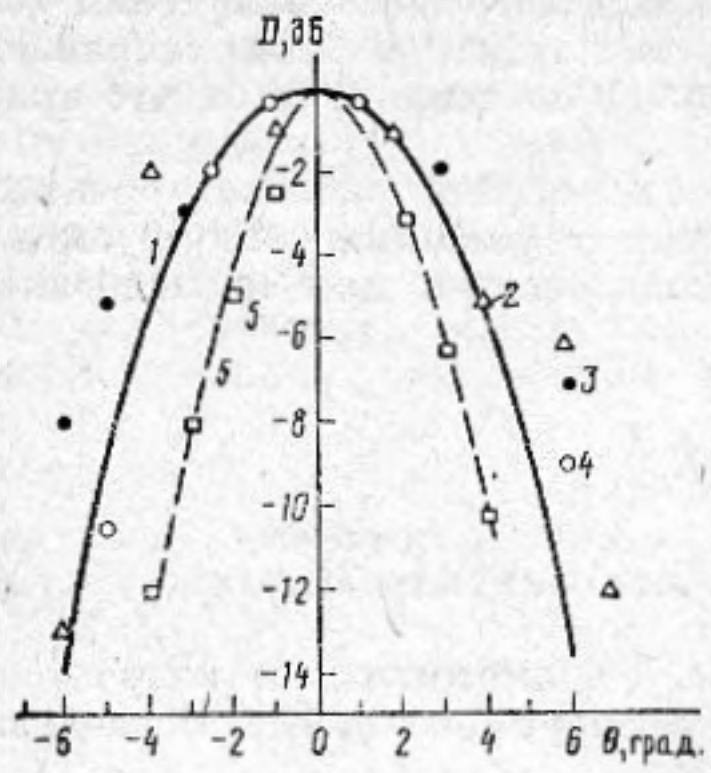

Рис. 1

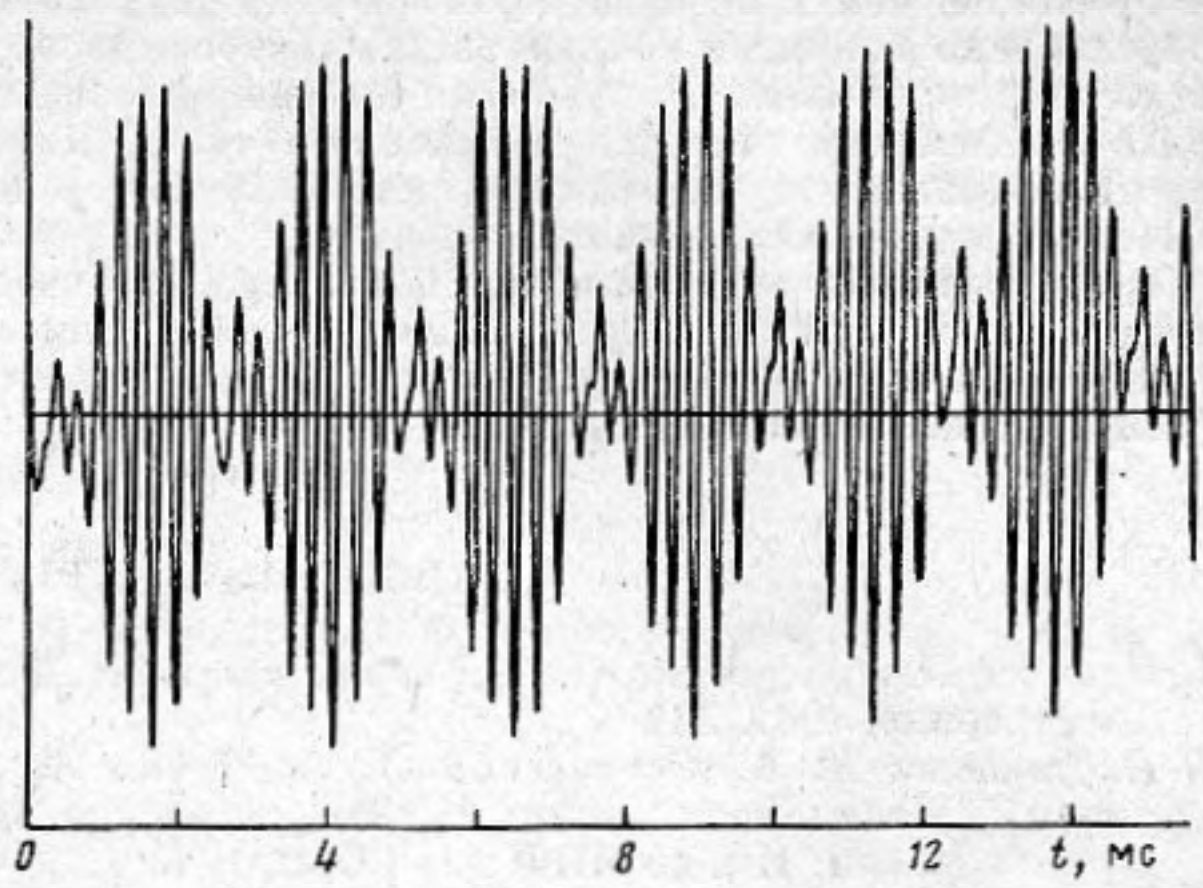

Рис. 3

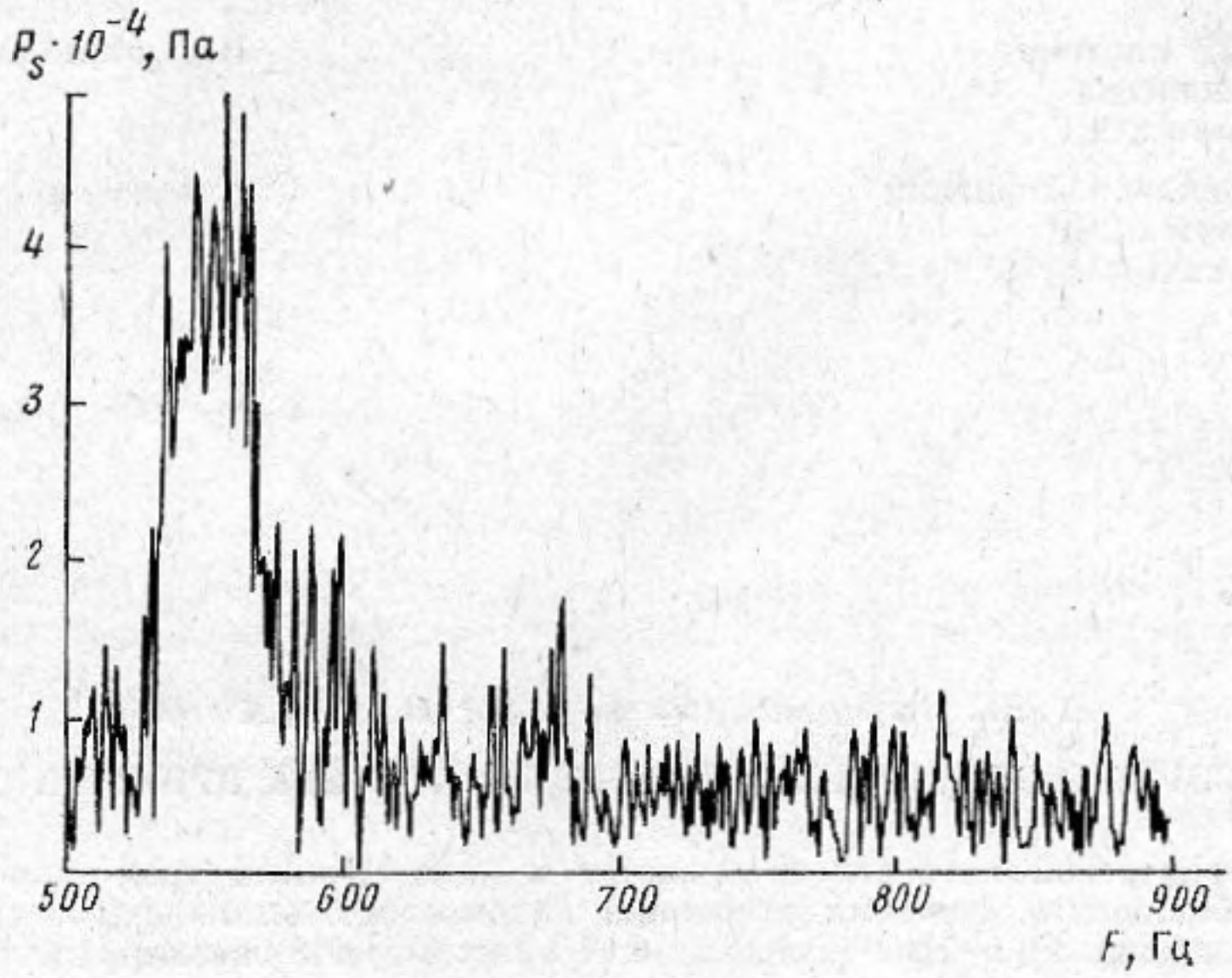

Рис. 2

Рис. 1. Характеристики направленности при работе в параметрическом режиме. Кривая – расчет по формуле $D(\theta)=D_H^2(\theta)$, $D(\theta)=\dfrac{\sin(ka\sin\theta)}{ka\sin\theta}$, k – волновое число для волны накачки, a – горизонтальный размер антенны. Знаками представлены экспериментальные данные для различных частот: треугольниками – $f=300$ Гц; точками – $f=620$; кружками – $f=970$, квадратиками – $f=400$ Гц, импульсная модуляция

Рис. 2. Спектр параметрически излученного широкополосного сигнала; принято на расстоянии 180 км

Рис. 3. Осциллограмма акустического сигнала, излученного при импульсно-модулированном возбуждении излучателя

лял $5\cdot10^{-4}$ Па. На рис. 2 приведен спектр принимаемого сигнала. За время обработки разностная частота изменялась от 540 до 570 Гц.

Интересна возможность реализации параметрического режима работы без разделения гидроакустической антенны на группы преобразователей и без использования бигармонического возбуждения. Для этого антенна запитывалась импульсно-модулированным сигналом с синусоидальным заполнением при скважности, равной двум. Частота следования импульсов соответствует требуемой частоте излучения в параметрическом режиме. Такой режим может быть использован для параметрического излучения в акустических системах, у которых генераторные устройства построены на ключевых элементах. В проводимом эксперименте частота следования импульсов была 400 Гц. На рис. 3 приведена запись осциллограммы принятого сигнала на гидрофон, расположенный на расстоянии около 700 м от излучателя. Видно, что при описанном режиме возбуждения излучается амплитудно-модулированная волна. Измеренный на частоте 400 Гц уровень излучения составлял 182 дБ/мкПа·м,

что больше, чем при раздельной запитке двух половин антенны. Такое повышение обусловлено большой концентрацией энергии в более узком пучке накачки. Соответственно сужается и диаграмма направленности параметрического излучения (см. рис. 1). Отметим, что для достижения такой ширины характеристики направленности обычным излучателем его линейный размер должен составлять 50 м, что практически трудно реализуемо.

Проведенные эксперименты показали, что введение параметрического режима излучения в мощные акустические системы существенно расширяет их функциональные возможности и он может эффективно использоваться для исследования распространения звука в океане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимощенко В. И.* Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.
2. *Наугольных К. А., Островский Л. А., Сутин А. М.* Параметрические излучатели звука // Нелинейная акустика. Теоретические и экспериментальные исследования. Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1980. С. 9–30.
3. *Berstay H. O., Leahy D. J.* Farfield performance of parametric transmitters. // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 55. P. 539–546.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Институт прикладной физики
Академии наук СССР
НПО «Славутич»

Поступило в редакцию
19.10.89

УДК 534.1/.2

© 1990 г.

Л. М. Барковский, Фо Тхи Нгуен Ханг

ТЕНЗОРНЫЙ ЭЙКОНАЛ В ГЕОМЕТРИКОАКУСТИКЕ КРИСТАЛЛОВ

В геометрической акустике изотропных и анизотропных сред широко применяются приближенные решения уравнений Гельмгольца, описываемые скалярными функциями эйконала [1–5]. В работах [6, 7] рассмотрены эволюционные операторные решения одномерных тензорных уравнений Гельмгольца для слоистых анизотропных сред. Эволюционный оператор, характеризующий изменения векторного поля смещений, имеет экспоненциальную форму в пределах каждого слоя. При этом в показателях экспонент располагаются тензорные фазы, зависящие линейно от координаты и времени [6–8]. Как эволюционные операторы в целом так и тензорные фазы характеризуют поведение векторов смещений и лучей нормальных волн, на которые распадаются поля в однородной анизотропной среде. Тензорные фазы в каждой точке линейной анизотропной среды компактно характеризуют как скорости распространения нормальных волн так и их поляризации. Пусть анизотропная среда харатеризуется плотностью ρ и тензором модулей упругости C_{ijkl}, являющимися функциями одной переменной $\xi=\mathbf{nr}$, где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки наблюдения, а $\mathbf{n}$ – фиксированный вектор, нормированный по условию $\mathbf{n}^2=1$. Для монохроматической волны $\mathbf{u}(\xi, t)=\mathbf{u}(\xi)e^{-i\omega t}$, уравнение движения упругой среды имеет вид [7]

$$\frac{d}{d\xi}\left[\Lambda(\xi)\frac{d}{d\xi}\mathbf{u}(\xi)\right]+\rho\omega^2\mathbf{u}(\xi)=0, \tag{1}$$

где $\Lambda_{il}(\xi)=n_jC_{ijkl}(\xi)n_k$, $\mathbf{u}(\xi)$ – вектор смещения. Эволюционное решение уравнения (1) в случае однородной анизотропной среды дается формулой [8]

$$\mathbf{u}(\xi)=\exp(i\omega\xi N)\mathbf{u}(0), \tag{2}$$

где N – оператор нормальной рефракции, независящий от ξ. В выбранной системе координат формула (2) принимает вид $u_k(\xi)=[\exp(i\omega\xi N)]_{kl}u_l(0)$, где $k, l=1, 2, 3$, по повторяющимся индексам подразумевается суммирование от 1 до 3. Оператор $\exp[i\omega(\xi N-t)]$ характеризует трансформации поляризации группы нормальных волн, обладающих тремя плоскими волновыми фронтами, распространяющимися с разными скоростями [9]. Изложенный в [6–8] подход позволяет при переходе от волновой акустики анизотропных сред к геометроакустике слабонеоднородных сред вместо тензорных фаз использовать тензоры эйконалов, являющиеся естественным (плосковолновым) обобщением первых.