Том ХХХІІ 1986 Вып. 1

УДК 534+534.231.2

ВЫДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В МЕЛКОМ МОРЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ

Елисеевнин В. А.

Излагается метод выделения нормальных волн в изоскоростном волноводе с помощью вертикальной линейной антенны. Рассмотрение проводится на примере модели мелкого моря Пекериса. Метод заключается в определенной обработке сигнала, основанной на многократном отображении звукового поля и апертуры антенны относительно границ водного слоя.

При изучении распространения звука в морях и океанах в диапазоне низких звуковых и инфразвуковых частот звуковое поле может быть представлено в виде совокупности нормальных волн [1, 2]. Часто возникает необходимость в определении законов распространения каждой нормальной волны в отдельности и, следовательно, в выделении этих нормальных волн. Среди методов выделения нормальных волн наиболее распространенным в морском эксперименте является метод пространственной фильтрации [3, 4]. Он основывается на свойстве ортогональности частных решений волнового уравнения, согласно которому интеграл повертикальной координате от произведения двух нормальных волн (являющихся частными решениями волнового уравнения) равен нулю, если эти нормальные волны различные, и конечной величине, если они одинаковые. Если задать распределение чувствительности (по амплитуде и фазе) вертикальной антенны пропорционально распределению по вертикали поля одной из нормальных волн, то сигнал с выхода антенны будет соответствовать приему именно этой нормальной волны.

Таким образом, для реализации метода пространственной фильтрации необходимо знание распределения по вертикали амплитуд и фаз нормальных волн, которые могут распространяться в волноводе в месте расположения антенны. При проведении эксперимента это требование означает необходимость измерения распределения скорости звука в водной толще, измерения свойств дна и решения волнового уравнения для измеренных параметров волновода с целью вычисления нормальных волн, которые необходимо экспериментально выделить. Поскольку измерение свойств морского дна технически трудная задача (а часто и невыполнимая), то на практике область применимости метода пространственной фильтрации оказывается ограниченной.

Ниже задача выделения нормальных воли решается в применении к случаю мелкого моря— однородный водный слой на жидком однородном полупространстве (модель Пекериса [5]). Расчет звукового поля на антенне и алгоритм его обработки с целью выделения нормальных воли реализуется на ЭВМ. Вместо метода пространственной фильтрации используется метод обработки сигнала, основанный на многократном отображении звукового поля в слое относительно его границ (метод «отображений»). В работе [6] рассматривалось применение этого метода в случае однородного водного слоя с абсолютно отражающими границами (идеального волновода).

Пусть морская среда, согласно [1, 2, 5], представляет собой однородный водный слой толщиной H с плоскопараллельными границами, постоянной скоростью звука C и плотностью ρ , ограниченный сверху абсолютно мягкой поверхностью с коэффициентом отражения -1, а снизу — однородным жидким полупространством с постоянной скоростью звука C_1 и

плотностью ρ_1 . Предполагается, что скорость звука и плотность в дне больше, чем в водном слое ($\rho/\rho_1 < 1$, $C/C_1 < 1$). Начало системы координат (r, z) располагается на поверхности и ось z направлена вертикально вниз.

Звуковое поле создается точечным ненаправленным источником, расположенным в водном слое на горизонте z₀ и излучающим тональный сигнал. Прием осуществляется на линейную вертикальную антенну с постоянной по ее длине L чувствительностью и центром на горизонте z. Апертура антенны L сравнима или меньше толщины водного слоя H. Антенна снабжена компенсатором, позволяющим электрически поворачивать ее фазовый фронт на заданный угол компенсации β в вертикальной плоскости.

Звуковое поле в водном слое может быть представлено в виде суммы нормальных волн (на больших расстояниях от источника полем боковой волны по сравнению с полем нормальных волн можно пренебречь):

$$u(r,z) = j\frac{2\pi}{H}\sum_{i=1}^{K} \Phi_{i}(x_{i})\sin(b_{i}Z_{0})\sin(b_{i}Z)H_{0}^{(1)}(\xi_{i}r), \qquad (1)$$

где

$$\Phi_l = x_l / \left(x_l - \sin x_l \cos x_i - \frac{1}{m_1^2} \cdot \frac{\sin^3 x_i}{\cos x_i} \right).$$

Значения x_l определяются как корни трансцендентного уравнения $m_1 = \rho_1/\rho$, $\mu = \sqrt[4]{1-(C/C_1)^2}$; $b_l = x_l/H$ и $\xi_l = \sqrt[4]{k^2-b_l^2}$ — вертикальная и горизонтальная компоненты волнового вектора k l-й нормальной волны; $H_0^{(1)}(\xi_l r)$ — функция Ханкеля первого рода нулевого порядка. Без затухания в слое может распространяться K нормальных волн, где $K \leq 2\mu H/\lambda + 1/2$.

Угловую структуру звукового поля в водном слое при приеме на вертикальную линейную антенну будем характеризовать ее откликом, определяемым как нормированная по максимуму интенсивность сигнала на выходе антенны в зависимости от угла компенсации β:

$$B(\beta) = u_a u_a^* / \max\{u_a u_a^*\}, \tag{2}$$

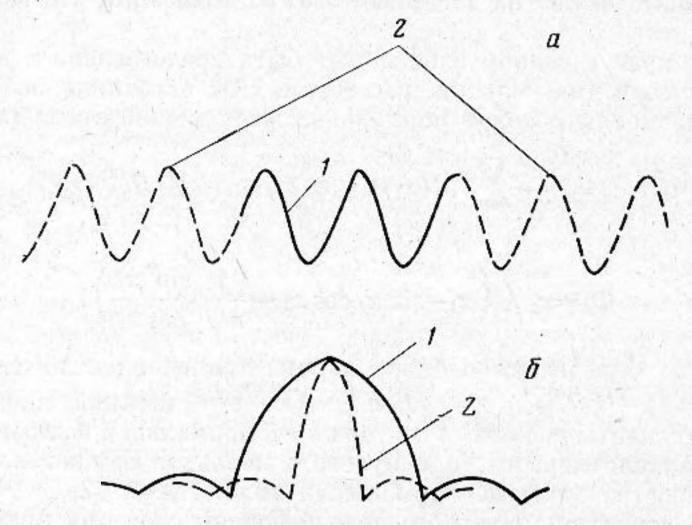
где u_a — сигнал на выходе антенны.

Как известно [1, 2], каждая нормальная волна в однородном водном слое может быть представлена в виде суперпозиции двух плоских волн, распространяющихся вдоль слоя наклонно под углами скольжения β_i = $\pm \arcsin{(b_i/k)}$. На вертикальную линейную антенну, помещенную в слой, приходит одновременно K пар плоских волн. Было бы логично, сканируя с помощью антенного компенсатора диаграммой направленности в вертикальной плоскости, попытаться определить углы скольжения этих плоских волн по угловым положениям соответствующих максимумов на кривой отклика антенны. Однако даже с апертурой, равной толщине водного слоя, выделить нормальные волны таким способом не удается — разрешающей способности антенны оказывается недостаточно для этого [6]. Для повышения разрешающей способности антенны и выделения нормальных волн необходима специальная обработка сигнала на выходе антенны.

Воспользуемся методом, изложенным в работе [6] и заключающимся в отображении звукового поля в водном слое ниже и выше границ слоя с учетом коэффициентов отражения от его границ. Другими словами, суть метода заключается в продолжении каждой пространственной синусоиды (нормальной волны) выше и ниже границ волновода. Наряду со звуковым полем многократно отображается и апертура антенны.

Сущность метода «отображений» становится понятной из рассмотрения следующей аналогии. Отрезок синусоиды (1, фиг. 1, a), обладающий спектром мощности (1, фиг. 1, б), может быть увеличен путем отображения вправо симметрично относительно оси ординат и влево симметрично относительно оси абсцисс, как показано на фиг. 1, a. Соответствующая этому увеличенному отрезку синусоиды спектральная кривая (2, фиг. 1, б) имеет более узкий главный и боковой максимумы. Увеличивая число отображений и удлиняя тем самым отрезок синусоиды, можно получить

спектральную линию для этого отрезка достаточно малой ширины. Подобные рассуждения будут справедливы, когда вместо одной имеется несколько синусоид. Антенна выполняет на своей апертуре пространственное преобразование фурье-поля. В случае однородного водного слоя многократным отображением поля и апертуры антенны относительно его границ можно добиться сколь угодно большой разрешающей способности антенны и выделить распространяющиеся в слое нормальные волны. В случае реальной морской среды число отображений, по-видимому, следует брать конечным, что будет определяться отношением полезного сигнала к шу-



Фиг. 1. Схема метода «отображений» при известных свойствах дна

мовой помехе, всегда присутствующей в волноводе. Однако этот вопрос требует специального исследования.

В случае идеального волновода известны коэффициенты отражения звука от его границ, $\hat{\mathbf{r}}$. е. для нормальной волны любого номера функция распределения звукового поля по вертикальной координате на поверхности вода — воздух всегда имеет узел (равна нулю), а на дне — всегда пучность (максимальное по абсолютной величине значение). При применении метода «отображений» получается непрерывная реализация звукового поля толщиной из 2P слоев, где $P{=}1, 3, 5, 7, \ldots$ нечетное число.

В отличие от идеального волновода в случае мелкого моря кривая распределения амплитуды нормальной волны по толщине волновода будет иметь на дне амплитуду, меньшую (в частном случае, равную) максимальной, положительную или отрицательную, различную для каждой нормальной волны. Поскольку распределение l-й нормальной волны по вертикали определяется функцией $\sin(b_l z)$, то справедливо следующее соотношение:

$$b_l(H+D_l) = l\pi, \tag{3}$$

где D_i — расстояние от дна до ближайшего узла «продолженной» синусоиды. Из (3) следует, что

 $D_l = l\pi/b_l - H. \tag{4}$

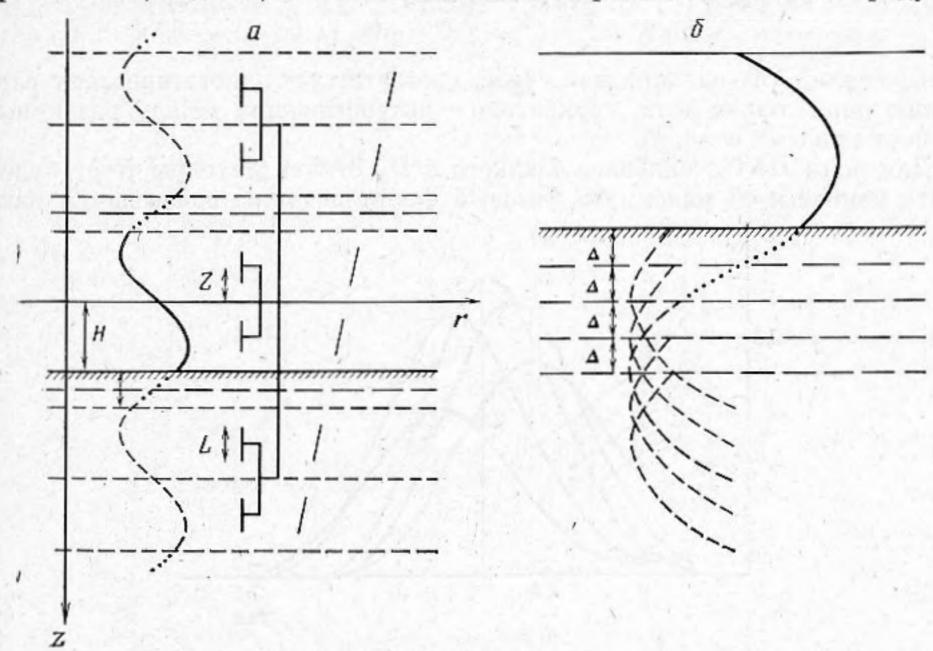
Величина D_t различна для различных нормальных волн, хотя это различие и незначительно. Поэтому необходимо процедуру выделения нормальных волн применять последовательно— сначала выделяется первая нормальная волна, затем вторая и т. д.

Для выделения l-й нормальной волны необходимо отобразить звуковое поле в слое вверх и вниз относительно его границ так, как показано на фиг. 2, a, с коэффициентом отражения звука -1 на горизонтах $z=(2H+2D_l)i$, где i=0, ± 1 , ± 2 , ... Полученная после отображений реализация поля оказывается не сплошной (как в случае идеального волновода),

а разрывной — слои поля толщиной 2H чередуются свободными от поля

промежутками толщиной $2D_{i}$.

Если свойства дна неизвестны, то неизвестны величины b_l или D_l для нормальных волн, распространяющихся в слое, и задача выделения нормальной волны решается путем перебора значений интервала между слоями D и нахождения значения, наиболее близкого к величине D_l . Для каждой нормальной волны проводится последовательно ряд отображений для значений $D=\Delta$, 2Δ , 3Δ ,..., $n\Delta$. Для каждого шага $i\Delta$ рассчитывается величина отклика антенны $B(\beta)$ (фиг. $2, \delta$). Величина Δ выбирается произвольно, но так, чтобы выполнялось неравенство $\Delta \ll H$. Наряду со



Фиг. 2. Схема метода «отображений» при неизвестных свойствах дна

звуковым полем многократно отображается и апертура антенны, которая теперь состоит из отрезков длиной L, сгруппированных определенным образом. Фазовый центр такой антенны соответствует координате z=0. Для рассматриваемой модели мелкого моря Пекериса [5] сигнал на выходе такой «удлиненной» антенны для заданного значения интервала D при многократных отображениях будет

$$u_{a}=j\frac{2\pi}{H}\sum_{l=1}^{K}\Phi_{l}(x_{l})\sin(b_{l}Z_{0})H_{0}^{(1)}(\xi_{l}r)\times \times \sum_{i=-m}^{m}\left(\int_{(2H+D)(i+2)}^{(2H+D)(i+2)}u_{i}(z)dz+\int_{(2H+D)(i-b)}^{(2H+D)(i-b)}u_{i}(z)dz\right),$$
 (5)

тде $u_i(z) = \sin[b_i(z-(2D_i-D)i)] \exp(-jkz \sin\beta)$, a = Z-L/2, b=Z+L/2, m=(P-1)/2, P=1, 3, 5, 7, ...

После соответствующих преобразований выражение для отклика антенны запишется в виде

$$B(\beta) = \sum_{l=1}^{K} D_l^2(\beta) + 2 \sum_{l=1}^{K-1} \sum_{q=l+1}^{K} D_l(\beta) D_q(\beta) \cos[(\xi_l - \xi_q)r], \qquad (6)$$

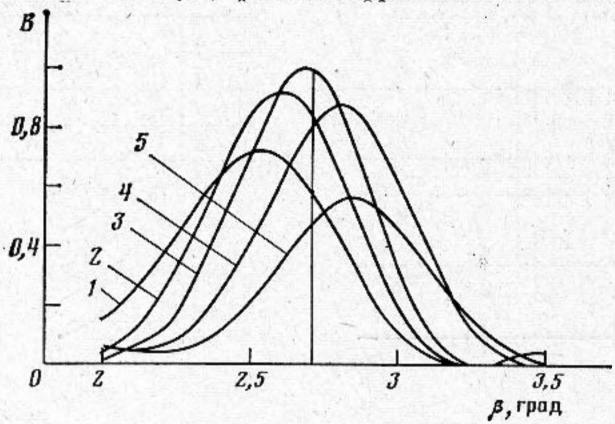
 ${f a}$ отклик антенны на одну ${\it l}$ -ю нормальную волну будет

$$D_{t}(\beta) = \frac{1}{\sqrt{\xi_{t}}} \Phi_{t}(x_{t}) \sin(b_{t}Z_{0}) [J_{-}-J_{+}], \qquad (7)$$

$$J_{\mp} = \frac{\sin \pi \frac{L}{\lambda} \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta \right)}{\pi \frac{L}{\lambda} \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta \right)} \cos \left[2\pi \frac{Z}{\lambda} \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta \right) \right] \times \frac{\sin \left\{ P 2\pi \left[\left(\frac{D_{l}}{\lambda} - \frac{D}{\lambda} \right) \frac{b_{l}}{k} - \left(\frac{H}{\lambda} + \frac{D}{\lambda} \right) \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta \right) \right] \right\}}{P \sin \left\{ 2\pi \left[\left(\frac{D_{l}}{\lambda} - \frac{D}{\lambda} \right) \frac{b_{l}}{k} - \left(\frac{H}{\lambda} + \frac{D}{\lambda} \right) \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta \right) \right] \right\}}.$$
 (8)

В выражении (6) однократная сумма соответствует энергетическому сложению нормальных волн, двукратная — интерференции между различными нормальными волнами.

Для шага $D=i\Delta$, наиболее близкого к D_l , отклик антенны $B(\beta)$ будет иметь наибольший максимум, фазовый фронт антенны оказывается наи-



Фиг. 3. Выделение первой нормальной волны методом «отображений» при неизвестных свойствах дна: $1-i=0,\ 2-i=1,\ 3-i=2,\ 4-i=3,\ 5-i=4.$ Параметры задачи: L=8 $\lambda,\ H=10$ $\lambda,\ Z_0=Z=0,6$ $H,\ R=500$ $\lambda,\ C=1500$ м/с, $\rho=1$ г/см³, $C_1=1800$ м/с, $\rho_1=2$ г/см³

лучшим образом сфазированным к фронту плоской волны, составляющей l-ю нормальную волну.

На фиг. З представлены результаты расчетов отклика антенны B(β) по изложенному выше методу для выделения первой нормальной волны. Кривые B(β) нормированы по максимальному значению, принимаемому в расчетах за единицу. Вертикальной прямой отмечено значение угла скольжения плоских волн, составляющих первую нормальную волну.

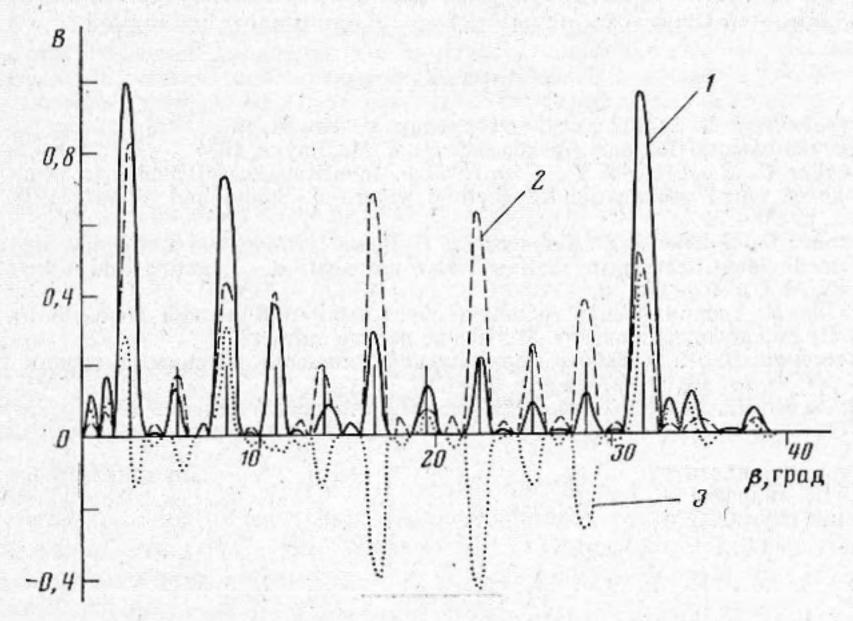
Точность расчетов может быть повышена путем уменьшения величины шага Δ . Поскольку выделение нормальных волн производится последовательно, сначала выделяется первая нормальная волна, затем вторая и т. д., то нет необходимости считать отклик для всех значений β от 0 до 90° каждый раз. Зная, что коэффициент отражения звука от дна лежит где-то между -1 и +1 и зная толщину водного слоя H, можно рассчитать значения углов скольжения плоских волн, составляющих l-ю нормальную волну, для этих предельных значений коэффициента отражения β_l и β_l . Истинное значение для исследуемого случая лежит где-то в интервале (β_l +, β_l -). Поэтому для l нормальной волны диапазон углов β , для которых необходимо считать отклик $B(\beta)$ для различных $i\Delta$, следует выбирать исходя из значений интервала (β_l +, β_l -). Выделив одну нормальную волну, можно переходить к выделению следующей нормальной волны и т. д.

В случае, когда известны свойства дна, т. е. известны величины b_i или D_i , процедура выделения нормальных волн сильно упрощается. Необходимость в переборе по Δ отпадает, берется сразу $D{=}D_i$. Третий сомножи-

тель в правой части выражения (8) в этом случае принимает вид

$$\frac{\sin\left[P 2\pi \left(\frac{H}{\lambda} + \frac{D_{l}}{\lambda}\right) \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta\right)\right]}{P \sin\left[2\pi \left(\frac{H}{\lambda} + \frac{D_{l}}{\lambda}\right) \left(\frac{b_{l}}{k} \mp \sin \beta\right)^{1}}.$$

Сомножитель перед квадратной скобкой в выражении (7) характеризует степень возбуждения l-й нормальной волны. Выражения J_{\mp} в (8) представляют собой отклики антенны на две плоские волны, составляющие l-ю



Фиг. 4. Выделение нормальных волн методом «отображений» при известных свойствах дна. Параметры заданы те же, что и на фиг. 3: 1- полный отклик антенны, 2- его энергетическая часть, 3- его интерференционная часть

нормальную волну и распространяющиеся вдоль слоя наклонно под углами скольжения β_t. Эти отклики имеют максимумы при углах компенса-

ции β , в точности равных углам скольжения $\pm \beta_l$.

Из анализа выражения (8) следует, что антенна, полученная в результате применения метода «отображений», состоит из P групп по две линейные антенны апертуры L в каждой группе. Диаграмма направленности такой антенны согласно «теореме умножения» [7] будет определяться произведением диаграммы линейной антенны с апертурой L, диаграммы направленности диполя с расстоянием 2Z между приемниками и диаграммы антенной решетки из P точечных ненаправленных приемников с шагом 2H (соответственно первый, второй и третий сомножители в выражении (8)).

Выделение нормальных волн также производится последовательно. Сначала антенна настраивается на первую нормальную волну с учетом D_i и выделяется первая нормальная волна, затем — на вторую и т. д. Знание величины b_i или D_i равносильно знанию фазовой скорости C_i l-й нормальной волны, поскольку $C_i = \omega/\xi_i = \omega/\sqrt{k^2 - b_i^2}$, где ω — угловая частота излучения.

На фиг. 4 представлен отклик антенны $B(\beta)$ для случая пятикратного отображения. Вертикальными прямыми отмечены значения углов скольжения, под которыми распространяются вдоль слоя плоские составляющие нормальных волн. На фиг. 4 видно четкое выделение нормальных

волн в виде отдельных пиков.

Если необходимо определить только угловые положения максимумов, соответствующих нормальным волнам, распространяющимся в волноводе, то использование метода «отображений» позволяет уменьшать апертуру антенны, что особенно важно при проведении эксперимента. Но при этом амплитуды нормальных волн определяются с ошибкой и тем большей, чем меньше апертура антенны L. Амплитуды нормальных волн определяются наиболее точно только в случае, когда апертура вертикальной линейной антенны L равна толщине водного слоя H. И только в этом случае возможно точное определение законов спадания звуковых полей отдельных нормальных волн с расстоянием.

Необходимо также помнить, что при наличии шумов моря уменьшение апертуры антенны приводит к уменьшению ее помехоустойчивости, а ис-

пользование метода «отображений» не увеличивает последней.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 2. Акустика океана/Под ред. Бреховских Л. М. М.: Наука, 1974.

Gazanhes C., Sessarego J. P., Garnier J. L. Identification of modes in some conditions of sound propagation in shallow water.— J. Sound and Vibrat., 1978, v. 56, № 2, p. 251-259.

4. Gazanhes C., Garnier J. L., Sessarego J. P. Beam forming and frequency dependence of mode identification in shallow water propagation.— J. Sound and Vibrat., 1979, v. 65, № 2, p. 165-176.

5. Пекерис К. Теория распространения звука взрыва в мелкой воде.— В кн.: Распространение звука в океане. М.: Изд-во иностр. лит., 1951.

6. *Елисеевнин В. А.* О работе вертикальной линейной антенны в водном слое.— Акуст. журн., 1981, т. 27, № 2, с. 228—233.

7. Смарышев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.

Акустический институт им. Н. Н. Андреева Академии наук СССР Поступила в редакцию 8.VI.1984