АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 2

УДК 534+534.231.2

О РАБОТЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ В ВОДНОМ СЛОЕ В ПОЛЕ УЗКОПОЛОСНОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА

Елисеевнин В. А.

Исследуются направленные свойства протяженной горизонтальной линейной антенны, помещенной в однородный водный слой с абсолютно отражающими границами, в поле узкополосного шумового сигнала. Направленные свойства антенны характеризуются ее откликом, представляемым в виде суммы энергетической и интерференционной частей.

В работе [1] изучались направленные свойства протяженной горизонтальной линейной антенны в водном слое в поле тонального сигнала. При исследовании распространения звука в морской среде часто используются немонохроматические источники — шумовые или импульсные. Вопрос о направленных свойствах антенны в гидроакустическом волноводе в поле узкополосного шумового сигнала впервые рассматривался в работе [2]. Однако автор ограничился рассмотрением случая двухэлементной антенны, сведя задачу к исследованию пространственно-временной корреляционной функции звукового поля. Ниже изучаются направленные свойства протяженной горизонтальной линейной антенны в водном слое в поле узкополосного шумового сигнала.

Будем рассматривать идеальный волновод — однородный водный слой толщиной H со скоростью звука в воде c, ограниченный плоскопараллельными абсолютно мягкой и абсолютно жесткой границами. Звуковое поле в слое создается точечным ненаправленным источником, расположенным на горизонте z_0 и излучающим стационарный шумовой сигнал со спектром мощности, постоянным в некотором частотном интервале (ω_1, ω_2) и равным нулю вне этого интервала. Относительная ширина этого спектра, характеризуемая параметром широкополосности $P=\Delta\omega/\omega_0$ $(\omega_0=(\omega_1+\omega_2)/2,\ \Delta\omega=(\omega_2-\omega_1)/2)$, очень мала — $P\ll 1$, т. е. сигнал узкополосный.

Прием осуществляется на горизонтальную линейную дискретную антенну, состоящую из N ненаправленных звукоприемников одинаковой чувствительности, принимаемой в расчетах за единицу, отстоящих друг от друга на расстоянии d. Антенна располагается на горизонте z. Ее размеры сравнимы или больше толщины водного слоя H. Сигналы с выходов звукоприемников складываются после предварительной задержки по времени, осуществляемой с помощью антенного компенсатора, что позволяет электрически поворачивать фазовый фронт антенны вокруг ее центра на заданный угол компенсации β. Расстояние по горизонтали между излучателем и фазовым центром антенны r_0. Предполагается, что излучатель находится в дальней зоне антенны. Направление на источник в горизонтальной плоскости составляет с нормалью к антенне угол α.

Звуковое поле в слое является совокупностью звуковых полей всех частотных составляющих излучаемого сигнала. В свою очередь звуковое поле каждой частотной составляющей представляется в виде суммы конечного числа незатухающих нормальных волн, распространяющихся в слое [3],

$$u(r,z,t)=j\frac{2\pi}{H}\exp(-j\omega t)\sum_{l=1}^{K}\cos(b_l z_0)\cos(b_l z)\,H_0^{(1)}(\xi_l r), \qquad (1)$$

где l — номер нормальной волны, $H_0^{(1)}$ — функция Ханкеля первого рода нулевого порядка, ξ_l и b_l — горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора $k=\omega/c$ l-й нормальной волны, $\xi_l=\sqrt{k^2-b_l^2}=$ $=\sqrt{k^2-[(l-0{,}5)\pi/H]^2}$.

Направленные свойства антенны в слое при приеме узкополосного шумового сигнала так же, как и в случае тонального сигнала [1], будем характеризовать ее откликом, определяемым как нормированная по максимуму интенсивность сигнала на выходе антенны в зависимости от направления на источник (угла α) и угла компенсации β

$$B(\alpha, \beta)=\frac{\langle u_{\text{а}}(t)\, u_{\text{а}}^*(t)\rangle}{\max\{\langle u_{\text{а}}(t)\, u_{\text{а}}^*(t)\rangle\}}, \tag{2}$$

$u_{\text{а}}(t)$ — сигнал на выходе антенны, угловые скобки означают статистическое усреднение по множеству реализаций, $*$ — комплексную сопряженность.

Интенсивность сигнала на выходе антенны представляет собой сумму пространственно-временных корреляционных функций звукового поля попарно между всеми звукоприемниками и нормальными волнами всех номеров, принимаемыми антенной, и может быть записана в виде суммы двух частей:

$$\langle u_{\text{а}}(t)\, u_{\text{а}}^*(t)\rangle=\sum_{i,\, j=1}^{N}\sum_{l,\, q=1}^{\text{к}} R_{lq}(r_i, r_j, \tau_{ij})=$$
$$=\sum_{i,\, j=1}^{N}\sum_{l=1}^{\text{к}} R_{ll}(r_i, r_j, \tau_{ij})+2\sum_{i,\, j=1}^{N}\sum_{l=1}^{\text{к}-1}\sum_{q=l+1}^{\text{к}} R_{lq}(r_i, r_j, \tau_{ij}), \tag{3}$$

где r_i — расстояние по горизонтали между излучателем и i-м звукоприемником, τ_{ij} — временная задержка между двумя приемниками, вносимая антенным компенсатором. Первая часть, первое слагаемое в правой части равенства (3), состоит из суммы пространственно-временных корреляционных функций между всеми звукоприемниками антенны, но только одного и того же номера нормальной волны. Вторая часть, второе слагаемое в правой части равенства (3), состоит из суммы пространственно-временных корреляционных функций между всеми звукоприемниками антенны, но нормальных волн различных номеров. По аналогии с работой [1] первую часть будем называть энергетической частью отклика, а вторую — интерференционной.

Пространственно-временные корреляционные функции узкополосного шумового сигнала в мелком море исследовались, в частности, в работах [2, 4—6]. Согласно результатам этих работ, а также учитывая, что автокорреляционная функция узкополосного шумового сигнала имеет вид $R(\tau)=F(\tau)\cos(\omega_0\tau)$, где $F(\tau)$ — огибающая функции автокорреляции, пространственно-временная корреляционная функция узкополосного шумового сигнала в гидроакустическом волноводе может быть записана в виде

$$R_{lq}(r_i, r_j, \tau_{ij})=A_{lq}(z_0, z)\, F\left[\tau_{ij}-\left(\frac{r_i}{U_l(\omega_0)}-\frac{r_j}{U_q(\omega_0)}\right)\right]\times$$
$$\times\cos\left[\tau_{ij}-\left(\frac{r_i}{V_l(\omega_0)}-\frac{r_j}{V_q(\omega_0)}\right)\right], \tag{4}$$

где величина $A_{lq}(z_0, z)$ характеризует степень возбуждения l-й и q-й нормальных волн в волноводе, $V_l(\omega_0)$ и $U_l(\omega_0)$ — фазовая и групповая скорости l-й нормальной волны. В рассматриваемом случае идеального волновода и прямоугольного спектра мощности излучаемого шумового сигнала

выражение для пространственно-временной корреляционной функции с точностью до постоянного множителя записывается в виде

$$R_{lq}(r_i, r_j, \tau_{ij}) = \frac{\cos(b_l z_0)\cos(b_q z_0)\cos(b_l z)\cos(b_q z)}{\sqrt{r_i r_j \xi_l \xi_q}} \times$$

$$\times \frac{\sin P\omega_0 \left[\tau_{ij} - \left(\frac{r_i}{U_l(\omega_0)} - \frac{r_j}{U_q(\omega_0)}\right)\right]}{P\omega_0 \left[\tau_{ij} - \left(\frac{r_i}{U_l(\omega_0)} - \frac{r_j}{U_q(\omega_0)}\right)\right]} \times$$

$$\cos\omega_0 \left[\tau_{ij} - \left(\frac{r_i}{V_l(\omega_0)} - \frac{r_j}{V_q(\omega_0)}\right)\right], \qquad (5)$$

где $V_l = 1/U_l$ $r_i = r_0 + (i-1)d\sin\alpha$, $\tau_{ij} = (i-j)\frac{d}{c}\sin\beta$, $U_l = c\sqrt{1-(b_l/k_0)^2}$. Таким образом, подставляя выражение (5) в соотношения (3) и далее (2), можно получить выражение для отклика антенны.

Не выписывая окончательную формулу для отклика антенны, приведем лишь выражение для энергетической части интенсивности сигнала на выходе антенны, которое после соответствующих преобразований может быть записано в виде

$$\sum_{i,j=1}^{N}\sum_{l=1}^{\text{к}} R_{ll}(r_i, r_j, \tau_{ij}) = \frac{1}{r_0}\sum_{l=1}^{\text{к}}\frac{1}{\xi_l}\cos^2(b_l z_0)\cos^2(b_l z) \times$$

$$\times \left\{N + 2\sum_{i=1}^{N-1}(N-i)\frac{\sin\left[2\pi P_i \frac{d}{\lambda_0}\left(\frac{c}{U_l(\omega_0)}\sin\alpha - \sin\beta\right)\right]}{2\pi P i \frac{d}{\lambda_0}\left(\frac{c}{U_l(\omega_0)}\sin\alpha - \sin\beta\right)} \times\right.$$

$$\left.\times \cos\left[2\pi i \frac{d}{\lambda_0}\left(\frac{c}{V_l(\omega_0)}\sin\alpha - \sin\beta\right)\right]\right\}. \qquad (6)$$

Устремляя в этой формуле параметр широкополосности P к нулю и используя известное соотношение

$$\frac{\sin^2 Nx}{N^2\sin x} = \frac{1}{N}\left[1 + \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N-1}(N-i)\cos(2xi)\right],$$

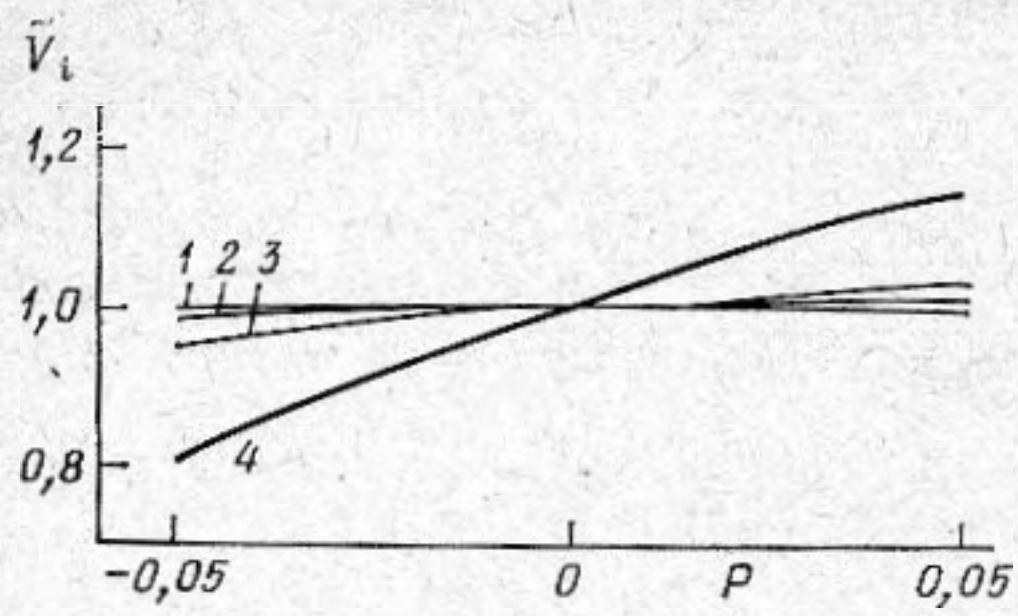
получаем выражение для энергетической части интенсивности сигнала на выходе антенны при приеме тонального сигнала, выведенное в работе [1]

$$\langle u_{\text{а}}(t)\, u_{\text{а}}^*(t)\rangle_{\text{э}} = \frac{N^2}{r_0}\sum_{l=1}^{\text{к}}\frac{1}{\xi_l}\cos^2(b_l z_0)\cos^2(b_l z) \times$$

$$\times \frac{\sin^2\left[N\pi\frac{d}{\lambda_0}\left(\frac{c}{V_l(\omega_0)}\sin\alpha - \sin\beta\right)\right]}{N^2\sin^2\left[\pi\frac{d}{\lambda_0}\left(\frac{c}{V_l(\omega_0)}\sin\alpha - \sin\beta\right)\right]}. \qquad (7)$$

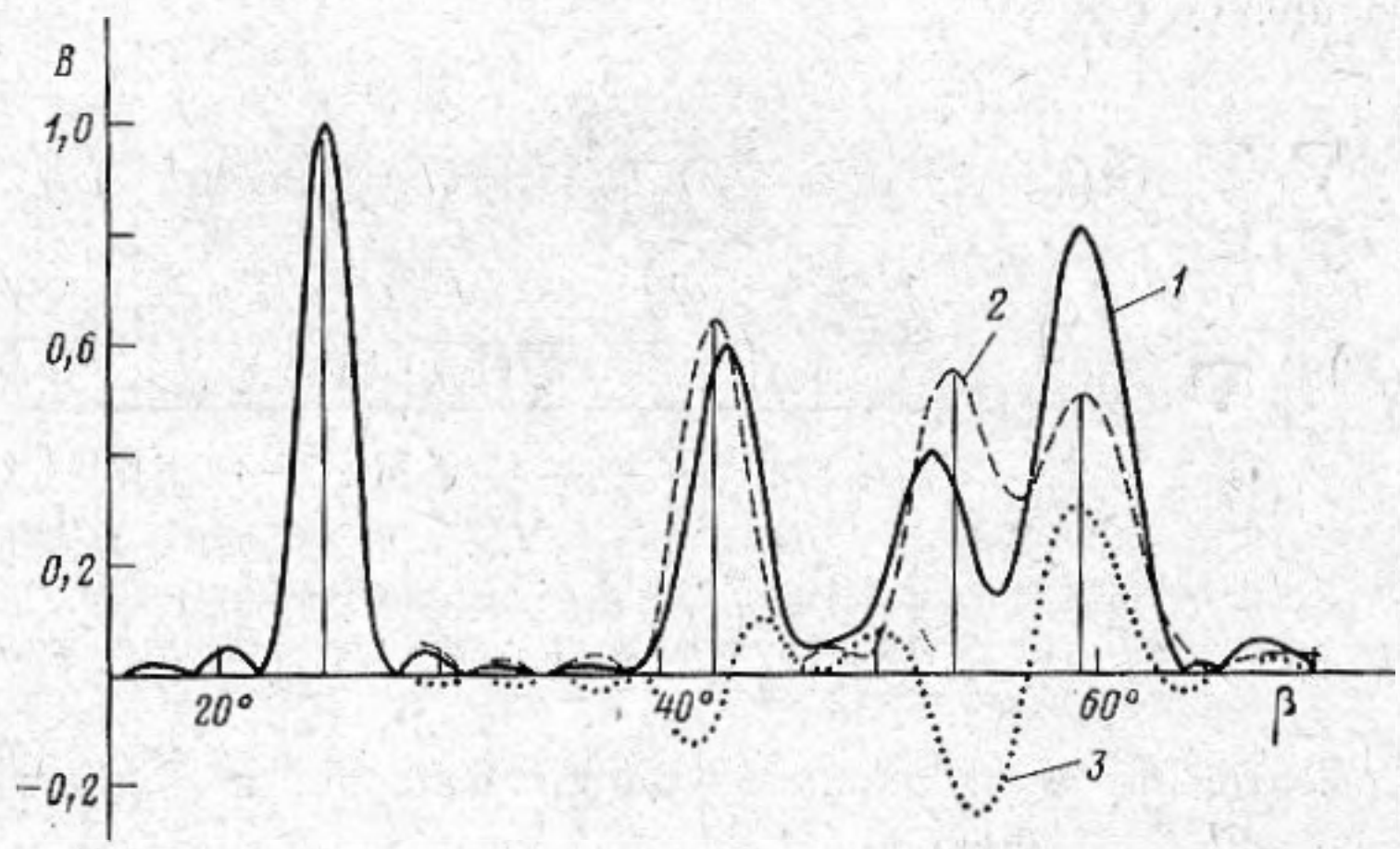
При выводе формулы (4) предполагалось, что изменения величин V_l, U_l и ξ_l в интервале частот спектра излучения очень малы и их значения брались соответствующими центральной частоте спектра $\omega = \omega_0$. Правомерность такого предположения подтверждается расчетами зависимости этих величин от параметра широкополосности P, из которых следует справед-

ливость формулы (4) вплоть до значений параметра $P=0{,}02$. На фиг. 1 представлены результаты расчетов величины $\tilde{V}_l=V_l(\omega_0)/V_l(\omega)$ в зависимости от параметра P (остальные параметры задачи те же, что и ниже для фиг. 2 и 3). Наименьший разброс значений наблюдается у первых трех нормальных волн, наибольший — у последней, четвертой нормальной волны.

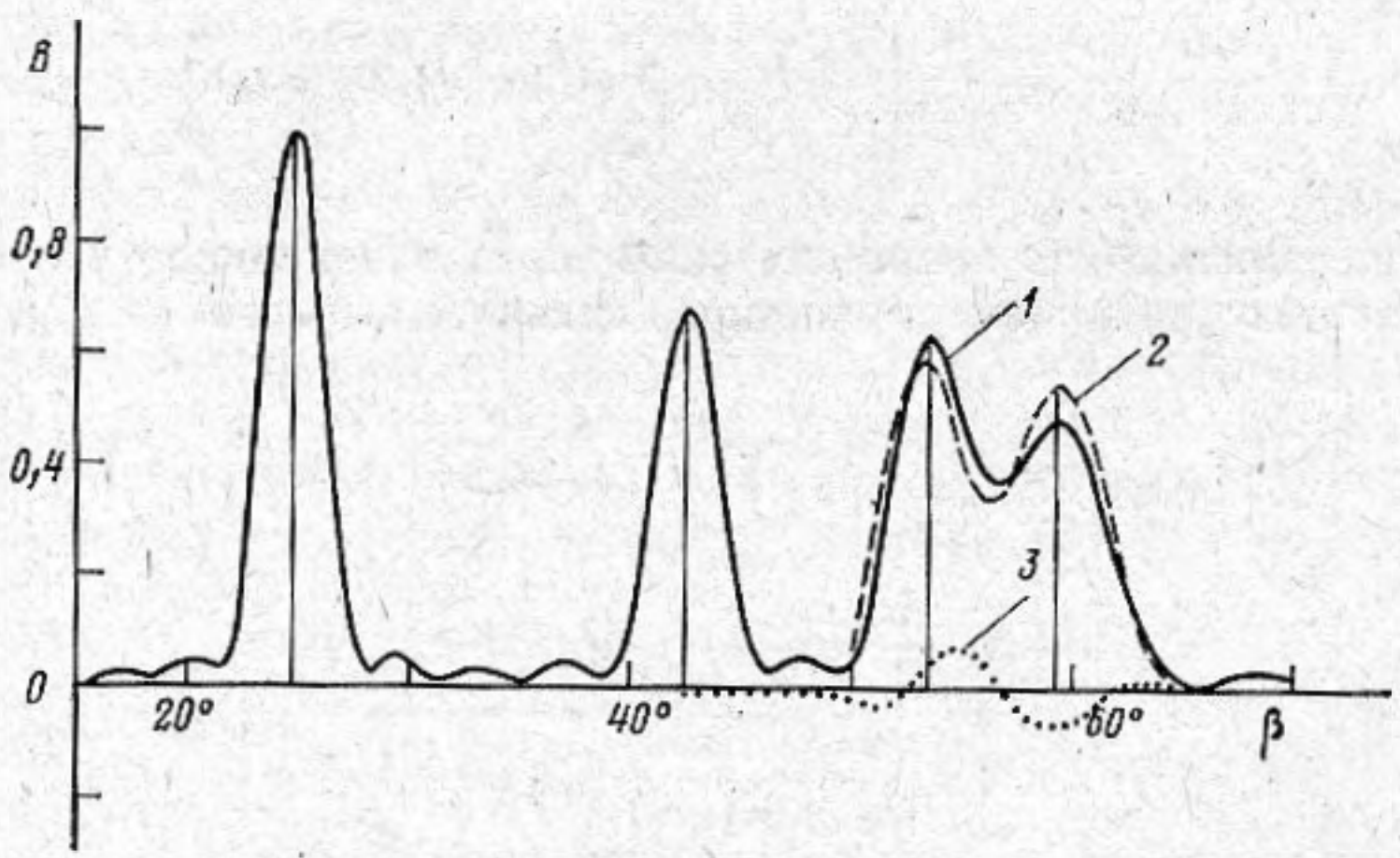


Фиг. 1. Зависимость нормированных фазовых скоростей нормальных волн $\tilde{V}_l$ от параметра широкополосности P

На фиг. 2 и 3 представлены результаты расчетов откликов антенны из $N=40$ звукоприемников в поле шумового сигнала со значениями параметра широкополосности $P=0{,}001$ и $P=0{,}01$ соответственно. Толщина водного слоя $H=2\lambda_0$ ($\lambda_0=2\pi c/\omega_0$) и звуковое поле формируется четырьмя незатухающими нормальными волнами. Расчеты проводились при значениях параметров $d=0{,}5\lambda_0$, $r_0=10^3\lambda_0$, $z=z_0=0{,}5H$ и $\alpha=60°$. На обоих фигурах кривые *1* — полный отклик антенны, *2* — энергетическая и *3* — интерференционная части отклика. В виде вертикальных прямых представлен угловой спектр распространяющихся в слое нормальных волн для тонального сигнала на частоте ω_0. Максимумы, соответствующие различным нормальным волнам, сдвинуты влево по оси



Фиг. 2. Отклик антенны в слое $B(\beta)$; $\alpha=60°$, $P=0{,}001$



Фиг. 3. Отклик антенны в слое $B(\beta)$; $\alpha=60°$, $P=0{,}01$

углов компенсации β от направления на источник $\alpha=60°$ и тем дальше, чем больше номер нормальной волны l. Первая и вторая нормальные волны «разрешаются» плохо, в то время как третья и четвертая — хорошо, выделяясь в виде отдельных максимумов. Точнее всего положения нормальных волн на оси углов компенсации β определяются максимумами энергетической части спектра. Таким образом, так же как и в случае тонального сигнала, для узкополосного шума возможно выделение нормальных волн, распространяющихся в волноводе, с помощью протяженной горизонтальной линейной антенны.

Отклик антенны при значении параметра широкополосности $P=0{,}001$ оказывается очень близким к отклику той же антенны в поле тонального сигнала с частотой ω_0. Анализируя зависимости, приведенные на фиг. 2 и 3, можно показать, что интерференционная часть отклика значительна там, где нормальные волны не разрешаются, и мала — где последние выделяются хорошо. Увеличение ширины полосы спектра шумового сигнала приводит к уменьшению интерференционной части отклика, которая уже для значений $P\geqslant 0{,}01$ становится пренебрежимо малой. Таким образом, в отличие от тонального сигнала [1], в случае шумового сигнала отклик антенны определяется исключительно его энергетической частью, и при значениях параметра широкополосности $P\geqslant 0{,}02\div 0{,}05$ интерференционная часть отклика в расчетах может не учитываться. Этот вывод в равной мере может быть отнесен к протяженным плоским и объемным антеннам в волноводе. Пренебрежение интерференционной частью отклика значительно сокращает объем расчетов (и, в частности, время счета на ЭВМ), что особенно важно в случае антенн больших размеров.

Выше рассматривался идеальный волновод. В случае мелкого моря или глубокого океана качественная картина сохранится, будут иметь место лишь количественные различия. Для расчетов могут быть использованы приводимые выше формулы, в которых необхоимо заменить величины b_l, ξ_l, V_l, U_l и A_{lq}. Последние определяются для каждого конкретного случая гидроакустического волновода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Елисеевнин В. А.* О работе горизонтальной линейной антенны в водном слое.— Акуст. ж., 1979, т. 25, № 2, с. 227—233.
2. *Clay C. S.* Array steering in a layered waveguid.— JASA, 1961, v. 33, № 7, p. 865—870.
3. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
4. *Толстой И., Клей К. С.* Акустика океана. М.: Мир, 1969.
5. *Бардышев В. И.* О пространственно-временной корреляции шумовых сигналов в мелкой воде.— В кн.: Морское приборостроение. Сер. Акустика, 1973, вып. 3, с. 15—34.
6. *Бардышев В. И.* Пространственно-временная корреляция шумового сигнала при мономодальном распространении в слое воды.— В кн.: Дальневосточный акуст. сб. Вып. 4. Владивосток, 1979, с. 75—78.

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

Поступила в редакцию
25.XI.1982