АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1999, том 45, № 1, с. 117–120

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534+534.231.2

МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПЕНСИРОВАННОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ В ВОДНОМ СЛОЕ

© 1999 г. В. Н. Голубева, В. А. Елисеевнин*

Московский институт коммунального хозяйства и строительства
109807 Москва, ул. Средняя Калитниковская, 30
**Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН*
117036 Москва, ул. Шверника, 4
e-mail: bvp.@acoins. msc.ru

Поступила в редакцию 04.12.97 г.

Исследуется акустическая мощность, излучаемая вертикальной компенсированной линейной антенной в однородном водном слое с абсолютно отражающими границами. Звуковое поле представляется в виде суммы нормальных волн. Рассматривается зависимость величины излучаемой мощности от параметров антенны и волновода.

В исследованиях Мирового океана томографическими методами используются протяженные антенные системы [1, 2]. Важным параметром, характеризующим работу излучающей антенны, является излучаемая ею акустическая мощность. В монографии [3] приводятся результаты расчетов акустической мощности антенны в однородном неограниченном пространстве. Исследованию мощности точечного ненаправленного и протяженного направленного гармонического источника в гидроакустическом волноводе посвящены работы [4–8]. Ниже решается частная задача, рассматривается мощность, излучаемая вертикальной компенсированной линейной антенной в идеальном волноводе, в зависимости от параметров антенны и волновода. Излучаемое антенной звуковое поле представляется в виде суммы нормальных волн [9].

Эквидистантная дискретная линейная антенна апертуры L, состоящая из N точечных ненаправленных элементов с равномерным амплитудным возбуждением, располагается в волноводе вертикально с центром на глубине Z_0 и излучает монохроматический сигнал частоты ω. Расстояние между соседними элементами d. Предполагается, что взаимодействие между этими элементами отсутствует. Антенна снабжена электронным компенсатором, сфазированным к центру антенны и позволяющим сканировать ее диаграммой направленности в вертикальной плоскости на заданный угол β, отсчитываемый от горизонтали. В качестве волновода рассматривался однородный водный слой толщины H с плоскопараллельными абсолютно отражающими границами (поверхность мягкая, дно жесткое).

Мощность излучения направленного источника в свободном пространстве определяется интегрированием по сфере большого радиуса интенсивности поля, создаваемого этим источником [3, 7, 8, 10]. Предлагаемый ниже подход к расчету мощности источника в волноводе является частным случаем этого общепринятого метода.

Звуковая энергия, излучаемая антенной в таком волноводе, переносится через боковую поверхность вертикального цилиндра, в центре которой находится антенна, и акустическая мощность определяется интегрированием интенсивности звукового поля по этой цилиндрической поверхности. С учетом цилиндрической симметрии звукового поля излучаемая мощность

$$W_a = \int_0^H\int_0^{2\pi} I_a(Z_0, Z, R)R\,d\alpha\,dZ = 2\pi R\int_0^H I_a(Z_0, Z, R)dZ. \quad (1)$$

Здесь α – азимутальный угол; R – радиус цилиндра. Значение R выберем таким, чтобы любая точка на его поверхности находилась в дальнем поле антенны. Интенсивность звукового поля в волноводе, излучаемого вертикальной линейной антенной, будет определяться выражением

$$I_a(Z_0, Z, R) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(P_a V_a^*) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(j\rho\omega u_a \frac{\partial u_a^*}{\partial R}\right). \quad (2)$$

P_a и V_a – давление и колебательная скорость звукового поля антенны в точке волновода (R, Z); ρ – плотность водной толщи; * – знак комплекс-

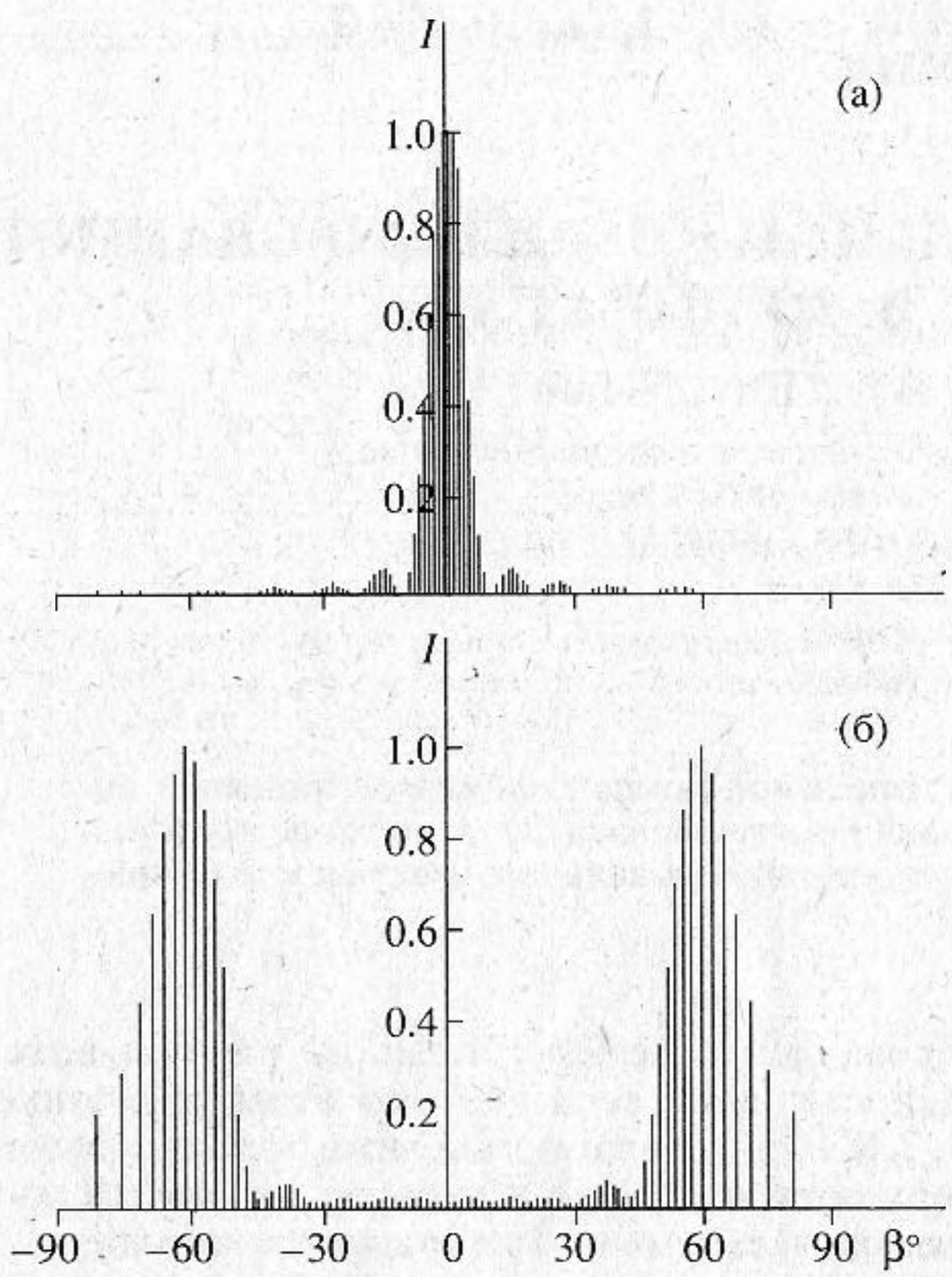

Рис. 1. Угловой спектр акустического излучения $I(\beta_l)$ вертикальной линейной антенны в волноводе. а – $\beta = 0°$; б – $\beta = 60°$.

ного сопряжения; звуковой потенциал поля антенны в точке волновода (R, Z) будет

$$u_a(R, Z) = \frac{A}{\sqrt{R}}\sum_{l=1}^{k}\frac{1}{\sqrt{\xi_l}}\cos(b_l Z)e^{j\xi_l R}\times$$

$$\times\sum_{i=-m}^{m}\cos[b_l(Z_0 + id)]e^{-jkid\sin\beta} =$$

$$= \frac{A}{\sqrt{R}}\frac{N}{2}\sum_{l=1}^{k}\frac{1}{\sqrt{\xi_l}}\cos(b_l Z)e^{j\xi_l R}[e^{jb_l Z_0}S_1 + e^{-jb_l Z_0}S_2], \quad (3)$$

$$m = \frac{N-1}{2}, \quad A = -j\frac{V_0}{\sqrt{2\pi H}}e^{-j\frac{\pi}{4}},$$

$$S_{1,2} = \frac{\sin\left[N\frac{d}{2}(b_l \pm k\sin\beta)\right]}{N\sin\left[\frac{d}{2}(b_l \pm k\sin\beta)\right]}. \quad (4)$$

l – номер нормальной волны; k – число нормальных волн, распространяющихся в волноводе без затухания; b_l и ξ_l – вертикальная и горизонтальная компоненты волнового вектора l-й нормальной волны. В выражении (4) знак минус относится к S_1, знак плюс – к S_2; V_0 – объемная скорость или производительность одного элемента антенны [3]; $k = \omega/c$ – волновое число, c – скорость звука в водной толще.

Подставляя (3) в (2) и далее в (1) и производя интегрирование по Z с учетом свойства ортогональности собственных функций волновода, получаем выражение для акустической мощности, излучаемой вертикальной антенной в волноводе

$$W_a = P_0\frac{\pi}{k}\frac{2}{H}\frac{N^2}{4}\sum_{l=1}^{k}[S_1^2 + S_2^2 + 2S_1S_2\cos(2b_l Z_0)]. \quad (5)$$

P_0 – акустическая мощность, излучаемая точечным ненаправленным монохроматическим источником с объемной скоростью V_0 в однородном неограниченном пространстве. Полагая $N = 1$, получаем выражение для акустической мощности, излучаемой точечным источником в волноводе (подробный анализ этого выражения при различных значениях параметров приводится в работах [5, 6])

$$W_0 = P_0\frac{\pi}{k}\frac{2}{H}\sum_{l=1}^{k}\cos^2(b_l Z_0).$$

Каждая нормальная волна в однородном волноводе представима в виде суперпозиции двух плоских волн, так называемых волн Бриллюэна [9], распространяющихся вдоль волновода наклонно под углами скольжения

$$\beta_l = \pm\arcsin(b_l/k).$$

Совокупность их амплитуд в зависимости от углов $\pm\beta_l$ для всех нормальных волн образует угловой дискретный спектр.

Излучаемое вертикальной линейной антенной в волноводе звуковое поле представляется в виде суммы нормальных волн с теми же фазовыми и групповыми скоростями, что и в случае звукового поля, излучаемого точечным ненаправленным источником. При нулевом угле компенсации излучаемый антенной угловой спектр оказывается равным угловому спектру точечного ненаправленного источника, расположенного на горизонте центра антенны, "взвешенному" диаграммой направленности этой антенны в свободном пространстве. Действительно, при $\beta = 0°$

$$W_a = P_0\frac{\pi}{k}\frac{2}{H}N^2\sum_{l=1}^{k}\left[\frac{\sin\left(N\pi\frac{d}{\lambda}\sin\beta_l\right)}{N\sin\left(\pi\frac{d}{\lambda}\sin\beta_l\right)}\cos(b_l Z_0)\right]^2.$$

Таким образом, направленность вертикальной антенны в волноводе проявляется в степени возбуждения излучаемых нормальных волн.

При угле компенсации, отличном от нулевого, угловой спектр, излучаемый антенной, оказывается равным угловому спектру точечного ненаправленного источника, "взвешенному" двумя диаграммами направленности этой антенны в свободном пространстве, скомпенсированной на углы $\pm\beta$. При этом учитывается набег фаз плоских волн, составляющих нормальные волны, от дна до фазового центра антенны.

На рис. 1 представлены угловые спектры $I(\beta)$ акустического излучения вертикальной линейной антенны с апертурой $L = 5\lambda$ ($N = 11$, $d = 0.5\lambda$) в волноводе толщиной $H = 25\lambda$ при углах компенсации $\beta = 0°$ (рис. 1а) и $\beta = 60°$ (рис. 1б). В таком волноводе без затухания распространяется $k = 50$ нормальных волн. Каждый спектр нормирован к своему максимальному значению. Фазовый центр антенны располагается на глубине $Z_0 = 0.5H$.

Обратимся к выражению (5) и рассмотрим зависимость излучаемой мощности от параметров антенны и волновода. При этом излучаемую антенной мощность W_a будем относить к мощности точечного ненаправленного источника в волноводе W_0, расположенного на горизонте центра антенны Z_0. Далее, пронормируем это отношение на величину N^2. Это будет означать, что производительность каждого элемента антенны в N раз меньше производительности точечного ненаправленного источника V_0, с которым мы сравниваем антенну.

Рассмотрим, как меняется излучаемая антенной мощность с изменением апертуры антенны L. На рис. 2 представлена зависимость от числа элементов антенны N величины

$$\eta = \frac{1}{N^2}\frac{W_a}{W_0} = \frac{\frac{1}{4}\sum_{l=1}^{k}(S_1^2 + S_2^2 + 2S_1S_2\cos(2b_lZ_0))}{\sum_{l=1}^{k}\cos^2(b_lZ_0)}.$$

Число N меняется от $N = 1$ (точечный ненаправленный источник) до $N = 100$, когда антенна перекрывает весь волновод по его толщине H. Расчеты выполнены для различного числа нормальных волн, распространяющихся в волноводе, и, следовательно, шаг d антенны будет различен для каждого k. Так при $k = 1$ (толщина $H = 0.5\lambda$, кривая *1*) апертура антенны при всех значениях N мало отличается по своим волновым размерам от точечного ненаправленного источника и ее мощность оказывается близкой к мощности излучения точечного ненаправленного элемента в волноводе. При большом числе нормальных волн, например $k = 100$ (кривая *7*), с увеличением апертуры антенны увеличиваются ее волновые размеры, сужается ее диаграмма направленности для свободного пространства и уменьшается число нормальных волн, "захваченных" этой диаграммой (см. рис. 1). Излучаемая антенной мощность с увеличением апертуры уменьшается, что иллюстрируется рис. 2. Здесь, так же как и на остальных рисунках, приводятся результаты расчетов, при которых фазовый центр антенны располагается на глубине $Z_0 = 0.5H$.

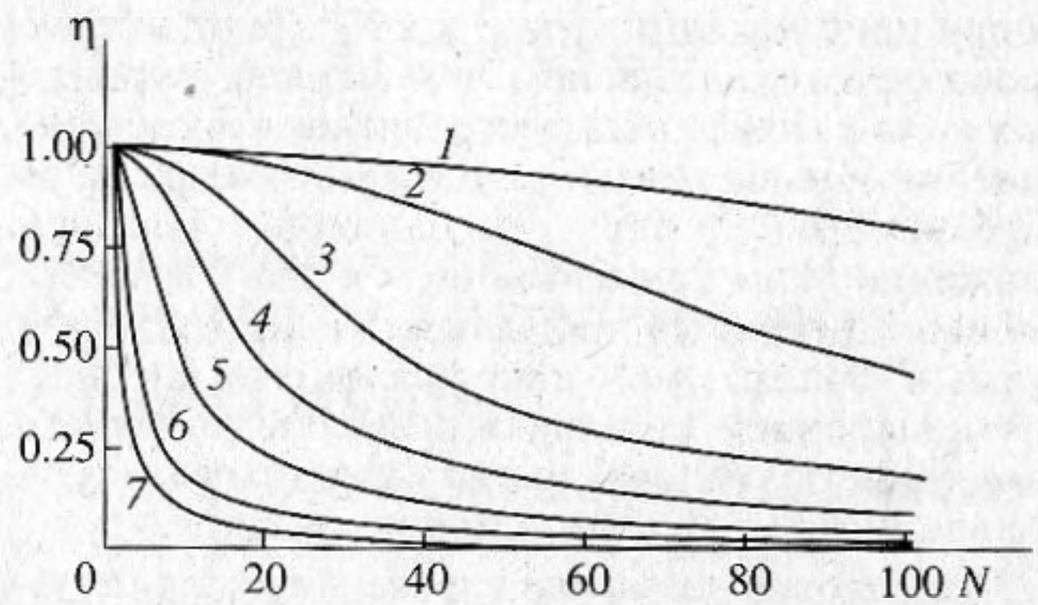

Рис. 2. Зависимость мощности акустического излучения вертикальной линейной антенны в волноводе от размеров ее апертуры при различном числе нормальных волн. *1* – $k = 1$; *2* – $k = 2$; *3* – $k = 5$; *4* – $k = 10$; *5* – $k = 20$; *6* – $k = 50$; *7* – $k = 100$.

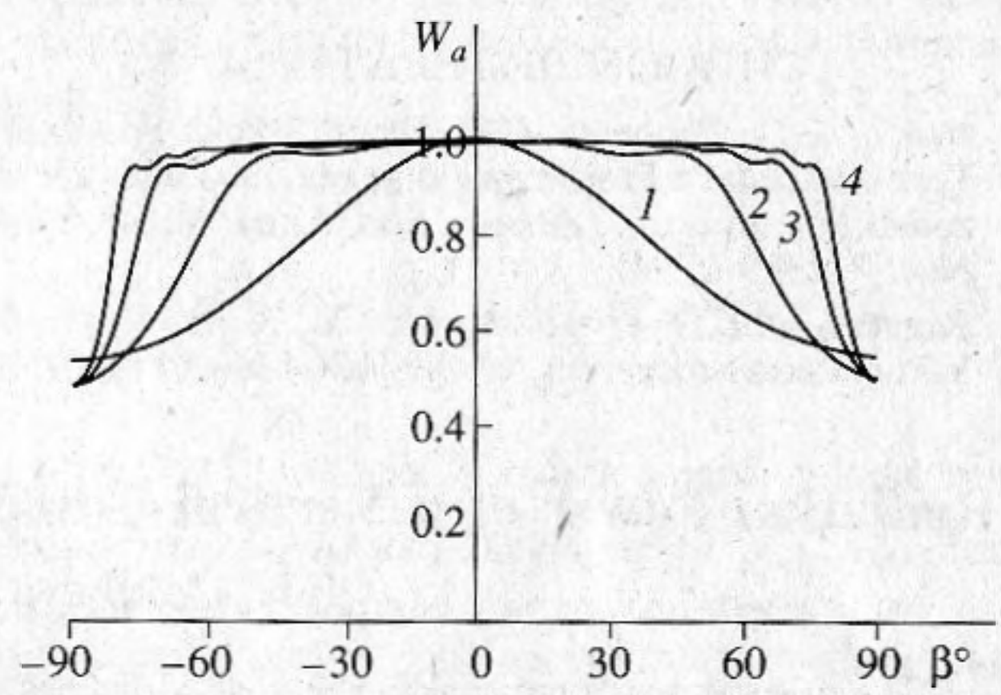

Рис. 3. Зависимость мощности акустического излучения вертикальной линейной антенны в волноводе от угла компенсации β. $Z_0 = 0.5H$, $N = 101$.
1 – $H = 0.5\lambda$, $d = 0.005\lambda$, $k = 1$; *2* – $H = 2.5\lambda$, $d = 0.025\lambda$, $k = 5$; *3* – $H = 10\lambda$, $d = 0.1\lambda$, $k = 20$; *4* – $H = 25\lambda$, $d = 0.25\lambda$, $k = 50$.

На рис. 3 представлена зависимость нормированной на максимальное значение мощности излучения вертикальной линейной антенны от угла компенсации β при различном числе распространяющихся в волноводе нормальных волн. Апертура антенны перекрывает всю толщину волновода. Излучаемая мощность, оставаясь более или менее постоянной на большей части диапазона углов компенсации β, довольно резко уменьшает-

ся при приближении угла β к $\pm 90°$. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем меньше нормальных волн k может распространяться в волноводе, или чем меньше оказываются волновые размеры антенны L/λ ($\lambda = 2\pi/k$ – длина волны). При приближении угла компенсации β к $\pm 90°$ начинает уменьшаться число нормальных волн, "захватываемых" диаграммой направленности антенны. С уменьшением волновых размеров антенны L этот эффект усиливается, так как диаграмма направленности при этом становится шире.

Все изложенное выше справедливо для случая идеального волновода. Для волновода с импедансным дном результаты, очевидно, будут другими, поскольку в этом случае имеет место затухание нормальных волн, появление боковой волны в водном слое и полей продольных и поперечных волн в упругом дне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heard G.J., Chapman N.R.* Heard Island Feasibility Test: Analysis of Pasific path data obtained with a horizontal line array // J. Acoust. Soc. Amer. V. 96. 1994. № 4. P. 2389–2394.
2. *Baggeroer A.B., Sperry B., Lashkari K., K. von der Heydt.* Vertical array receptions of the Heard Island transmission // J. Acoust. Soc. Amer. V. 96. 1994. № 4. P. 2395–2413.
3. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
4. *Тютекин В.В., Бобровницкий Ю.И.* Энергетические соотношения для акустических волноводов // ДАН СССР. 1985. Т. 285. № 4. С. 878–882.
5. *Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А.* О мощности, излучаемой акустическим источником, в океаническом волноводе // Акуст. журн. 1987. Т. 33. Вып. 6. С. 1051–1056.
6. *Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А.* О частотной зависимости мощности, излучаемой точечным источником в волноводе // ДАН СССР. 1989. Т. 304. № 5. С. 1119–1122.
7. *Вдовичева Н.К., Шерешевский И.А.* Применение принципа предельной амплитуды для расчета полей в слоистой среде // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 10. С. 1265–1274.
8. *Вдовичева Н.К., Фикс И.Ш.* Расчет мощности антенны, расположенной в плоско-слоистом волноводе // Препринт ИПФ АН СССР. № 256. Горький, 1990.
9. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
10. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1976.

Radiation Power of a Vertical Compensated Linear Array in a Water Layer

V. N. Golubeva and V. A. Eliseevnin

The acoustic power radiated by a vertical compensated linear array in a homogeneous water layer with perfectly reflecting boundaries is calculated. The sound field is represented as a sum of normal waves. The dependence of the radiated power on the array and waveguide parameters is considered.