АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2008, том 54, № 6, с. 956–961

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534+534.231.2

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ ПО МОЩНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В ВОЛНОВОДЕ

© 2008 г. Е. В. Голубева, В. А. Елисеевнин*

Webb Institute, 298 Crescent Beach Road Glen Cove, NY 11542

**Акустический институт им. Н.Н. Андреева*

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: egoloubeva@gmail.com

Поступила в редакцию 29.05.07 г.

Вводится определение диаграммы направленности излучающей гидроакустической антенны в волноводе как нормированной азимутальной зависимости излучаемой мощности. В качестве примеров рассматриваются диаграммы горизонтальной линейной и плоской прямоугольной вертикальной антенных решеток.

PACS: 43.30.Bp, 43.30.Vh

Одними из параметров, характеризующих работу излучающей гидроакустической антенны, являются ее диаграмма направленности и излучаемая акустическая мощность. Результаты расчетов этих параметров антенн различных конструкций в предположении, что антенна находится в однородном неограниченном пространстве, приводятся в монографиях [1–3]. Задача расчета этих параметров для антенн, работающих в волноводе, усложняется, так как помимо конструкции самой антенны необходимо учитывать также условия волноводного распространения звука [1–8]. В работе [7] введено понятие диаграммы направленности горизонтальной линейной антенны в гидроакустическом волноводе. По аналогии с определением диаграммы антенны в свободном пространстве она определялась, как нормированная по максимуму интенсивность излучаемого сигнала в горизонтальной плоскости на глубине Z и на расстоянии R от центра антенны (антенна располагалась на глубине Z_0) в ее дальней зоне в зависимости от азимутального угла α при некотором постоянном угле компенсации β. Под интенсивностью подразумевалась скалярная интенсивность PP^*, где P – звуковое давление. При таком определении диаграмма направленности зависит от параметров Z_0, Z и R. В силу интерференционного характера поля в волноводе зависимость от этих параметров приводит к неоднозначности в определении диаграммы направленности и в ряде случаев затрудняет интерпретацию результатов расчетов. В качестве альтернативного решения задачи ниже предлагается рассматривать диаграмму направленности по мощности излучения, представляющую зависимость излучаемой антенной в волновод звуковой энергии от азимутального угла α. Рассуждения проводятся на примерах горизонтальной линейной и плоской прямоугольной вертикальной дискретных антенных решеток.

Будем определять направленность антенны в волноводе в горизонтальной плоскости как зависимость от азимутального угла α при заданном угле компенсации β плотности потока мощности звуковой энергии, излучаемой антенной в заданном направлении (а точнее в некотором малом угловом секторе возле этого направления), и суммируемой по толщине волновода. Это означает интегрирование векторной интенсивности поля по толщине волновода в дальнем поле антенны при заданном угле α. Под векторной интенсивностью поля понимается величина $\mathrm{Re}((V_R^*)$, где V_R – горизонтальная компонента вектора колебательной скорости [9]. Определенная таким образом диаграмма характеризует распределение излучаемой антенной звуковой энергии в горизонтальной плоскости и не зависит от расстояния R и глубины горизонта приема Z. Остается зависимость только от глубины горизонта расположения антенны Z_0.

В качестве примера рассмотрим расчет диаграммы направленности по мощности излучающей горизонтальной компенсированой дискретной линейной антенны в идеальном волноводе.

Горизонтальная дискретная линейная антенна располагается в однородном водном слое толщины H с мягкой поверхностью и жестким дном на горизонте Z_0, состоит из N точечных ненаправленных источников (монополей) одинаковой производительности V_0 и излучает монохроматический сигнал частоты ω. Предполагается, что N нечетно, антенна эквидистантна с шагом $d = \lambda/2$ (λ – длина звуковой волны в водной толще) и снабжена компенсатором, позволяющим сканировать ее

диаграммой направленности в горизонтальной плоскости на заданный угол компенсации β.

Излучаемое антенной звуковое поле в слое представляется в виде суммы нормальных волн с теми же фазовыми и групповыми скоростями, что и в случае точечного ненаправленного источника, но с определенной направленностью в горизонтальной плоскости, определяемой параметрами антенны и слоя [7]. Звуковая энергия в слое переносится через боковую поверхность вертикального цилиндра высотой H и радиуса R. Центр антенны располагается на оси цилиндра и значение R выбирается так, чтобы любая точка на его поверхности находилась в дальнем поле антенны. Поскольку водная поверхность и дно полностью отражают звуковую энергию, то при расчете диаграммы производится интегрирование интенсивности звукового поля по Z в пределах толщины водного слоя H

$$D_{AB}^{G} = \int_{0}^{H}\int_{\alpha-\Delta\alpha/2}^{\alpha+\Delta\alpha/2} I_A(Z_0, Z, R, \alpha, \beta)R\,d\alpha\,dZ. \qquad (1)$$

Здесь I_A – интенсивность звукового поля, создаваемого антенной в точке (R, α, Z) слоя; α – угол в горизонтальной плоскости между нормалью к центру антенны и направлением в заданную точку водного слоя. $\Delta\alpha$ – угловой сектор в горизонтальной плоскости, в котором определяется поток мощности, излучаемый антенной в направлении угла α. Будем далее считать, что во всем секторе углов $(\alpha - \Delta\alpha/2, \alpha + \Delta\alpha/2)$ интенсивность определяется этим углом α. Тогда

$$D_{AB}^{G} = \Delta\alpha\int_{0}^{H} I_A(Z_0, Z, R, \alpha, \beta)R\,dZ. \qquad (2)$$

Интенсивность излучаемого антенной звукового поля в волноводе определяется как

$$I_A = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(P_A V_{AR}^{*}), \quad P_A = -\rho\frac{\partial U_A}{\partial t}, \qquad V_{AR} = \frac{\partial U_A}{\partial R}. \qquad (3)$$

U_A, P_A и V_{AR} – звуковой потенциал, давление и компонента вектора колебательной скорости по горизонтальному направлению R в точке (R, α, Z). ρ – плотность водной толщи. Согласно [4]

$$U_A = \frac{A}{\sqrt{R}}N\exp(-j\omega t)\sum_{l=1}^{m}\frac{1}{\sqrt{\xi_l}}\cos(b_l Z_0)\times \times\cos(b_l Z)\exp(j\xi_l R)D_l(\alpha, \beta), \qquad (4)$$

$$D_l(\alpha, \beta) = \frac{\sin\left[N\frac{d}{2}(\xi_l\sin\alpha - k_K\sin\beta)\right]}{N\sin\left[\frac{d}{2}(\xi_l\sin\alpha - k_K\sin\beta)\right]}, \qquad (5)$$

$$A = -j\frac{V_0}{\sqrt{2\pi}H}\exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right).$$

Здесь t – текущее время; l – номер нормальной волны; m – число нормальных волн, распространяющихся в слое без затухания; b_l и $\xi_l = \sqrt{k^2 - b_l^2}$ – вертикальная и горизонтальная компоненты волнового вектора l-ой нормальной волны; $k = \omega/C$ – волновое число и C – скорость звука в водной толще; D_l представляет собой диаграмму направленности антенны при излучении l-ой нормальной волны, называемую также парциальной диаграммой; $k_K = \omega/C_K$ и C_K – фазовая скорость, согласно которой осуществляется задержка сигнала компенсатором в канале каждого элемента антенны. Начало системы координат располагается на дне, и ось Z направлена вверх перпендикулярно границам слоя. Согласно (2) и (3) выражение для интенсивности звукового поля

$$I_A = B\frac{N^2}{4}\sum_{l=1}^{m}\sum_{q=1}^{m}\sqrt{\frac{\xi_q}{\xi_l}}\cos(b_l Z_0)\cos(b_q Z_0)\times \times\cos(b_l Z)\cos(b_q Z)\cos[(\xi_l - \xi_q)R]\times \times D_l(\alpha, \beta)D_q(\alpha, \beta), \qquad (6)$$

$$B = \frac{\rho\omega V_0^2}{4\pi H^2}.$$

Подставляя (6) в (2) и производя интегрирование по Z с учетом свойства ортогональности собственных функций волновода, получаем выражение для акустической мощности, излучаемой горизонтальной дискретной линейной антенной по вертикальному сечению волновода в заданном направлении, то есть выражение диаграммы направленности по мощности

$$D_{AB}^{G}(\alpha, \beta) = W_0\frac{\pi}{k}\frac{2}{H}\Delta\alpha\frac{N^2}{\pi}\sum_{l=1}^{m}\cos^2(b_l Z_0)D_l^2(\alpha, \beta), \qquad (7)$$

$$W_0 = \frac{\rho\omega^2 V_0^2}{8\pi C}. \qquad (8)$$

W_0 – акустическая мощность, излучаемая монополем в однородном неограниченном пространстве [9].

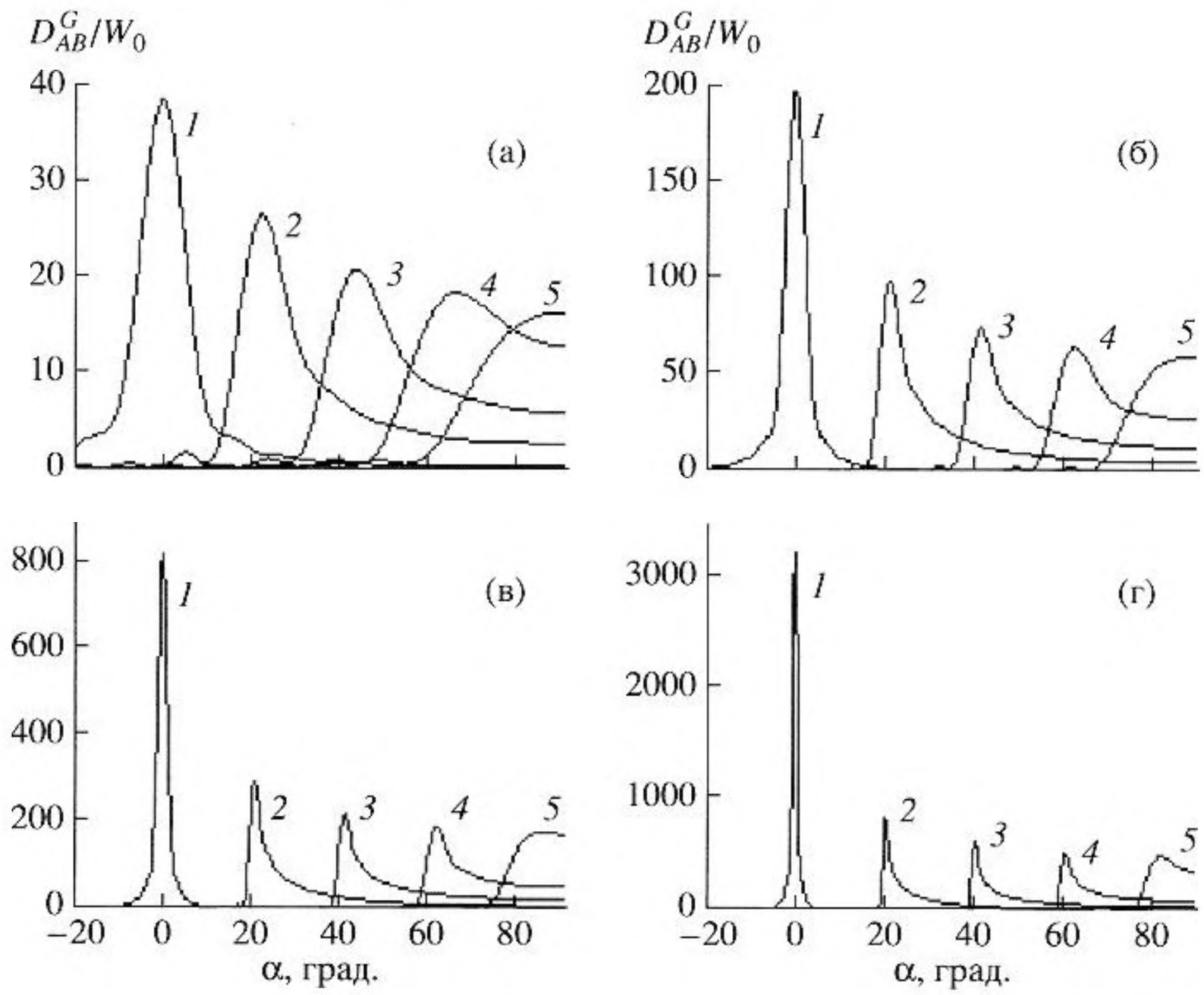

Рис. 1. Диаграммы направленности по мощности горизонтальной дискретной линейной антенны в водном слое при различных углах компенсации β и различном числе элементов в антенне N. $H = 50\lambda$, $m = 100$, $d = 0.5\lambda$, $Z_0 = 0.5H$, $\beta = 0°$, 20°, 40°, 60°, 80° – кривые *1–5*.
а. $N = 11$; б. $N = 25$; в. $N = 51$; г. $N = 101$.

Проиллюстрируем вышеизложенное результатами расчетов. Рисунок 1 показывает изменение формы кривой диаграммы горизонтальной дискретной эквидистантной линейной антенны в водном слое толщиной $H = 50\lambda$ при различных углах компенсации $\beta = 0°$, 20°, 40°, 60°, 80° (кривые *1–5*) и различном числе элементов в антенне $N = 11$, 25, 51, 101 (рис. 1а, 1б, 1в, 1г). В водном слое может распространяться $m = 100$ нормальных волн. Шаг антенны $d = 5\lambda$. Антенна располагается в середине водного слоя $Z_0 = 0.5H$, что обеспечивает одинаковое возбуждение всех нормальных волн. Все кривые на каждом из рисунков нормированы на одну величину – мощность излучения монополя в свободном пространстве W_0. Считается, что реализуемая в компенсаторе фазовая скорость $C_K = C$. Из рисунков видно, что только при $\beta = 0°$ кривые диаграмм имеют форму одного симметричного максимума наибольшей амплитуды по сравнению с остальными кривыми. С увеличением же углов компенсации β кривые имеют максимум в левой части при $\alpha = \beta$ в случае диаграммы и плавно уменьшаются с увеличением угла α. Картина, симметричная по отношению к оси ординат, имеет место для всех рисунков в диапазоне углов –90°–0°. Поскольку антенна излучает звуковую энергию в горизонтальной плоскости в обе стороны – вперед и назад, то так же имеет место симметричная картина в диапазоне углов от 90° до 270°. В этих диапазонах углов кривые диаграмм не рассматриваются.

Таким образом, излучаемая горизонтальной антенной звуковая энергия при ненулевом угле компенсации оказывается распределенной в некотором диапазоне углов α. Согласно (7) форма кривой диаграммы является результатом суммирования парциальных диаграмм отдельных нормальных волн, сдвинутых по оси углов α вправо при $\beta \neq 0°$. Как видно из выражения (5), угловое положение максимума парциальной диаграммы направленности l-ой нормальной волны D_l зависит от угла компенсации β [7]

$$\alpha_{l\max} = \arcsin\left(\frac{k}{\xi_l}\sin\beta\right). \qquad (9)$$

На рисунке 2 представлены зависимости $a_{l\max}$ от номера нормальной волны l, излучаемой антенной, для значений угла компенсации $\beta = 0°$, 20°, 40°, 60°, 80° (кривые *1–5* соответственно). Параметры задачи те же, что и на рис. 1. Только при $\beta = 0°$ (кривая *1*) угловые положения максимумов парциальных диаграмм всех нормальных волн будут одинаковыми и равными нулю. При этом сло-

жение парциальных диаграмм дает большой центральный максимум (кривая *1* на рис. 1). При β, отличном от нуля, $\alpha_{l\max}$ возрастает с ростом номера нормальной волны *l*, причем нелинейно. Это возрастание очень мало для нормальных волн начальных номеров, что и обусловливает наличие максимумов на кривых рис. 1. С ростом номера *l* возрастание $\alpha_{l\max}$ увеличивается. Скорость возрастания более или менее постоянна в среднем диапазоне номеров *l*, что определяет относительно постоянный уровень отклика в правой части кривых рис. 1. Как следует из формулы (9) при $\beta \neq 0°$, начиная с некоторого номера *l* значения $\alpha_{l\max}$ становятся больше 90°, что означает, что нормальные волны, начиная с этого номера и выше не будут излучаться антенной. Это видно из рис. 2, на котором кривые величины $\alpha_{l\max}$ возрастают до номеров нормальных волн *l*, величина которых уменьшается с ростом величины угла компенсации β.

Выше предполагалось, что компенсатор антенны "настроен" на фазовую скорость звука в водной толще, то есть $C_K = C$. При "настройке" компенсатора на другую фазовую скорость, например, на фазовую скорость одной из нормальных волн $C_K = C_l$, форма диаграмм может сильно измениться. Это может быть показано с использованием приводимых выше выражений.

В качестве другого примера рассмотрим диаграмму направленности по мощности плоской прямоугольной дискретной антенной решетки, располагающейся в водном слое вертикально. Поскольку схема расчета аналогична рассмотренной выше для горизонтальной линейной антенны, приведем лишь окончательные выражения. Диаграмма направленности по мощности плоской прямоугольной вертикальной излучающей дискретной антенны определяется выражениями

$$D_A^B = W_0 \frac{\pi}{k}\frac{2}{H}\frac{(N_1N_2)^2}{2\pi}\frac{\Delta\alpha}{4}\times \\ \times\sum_{l=1}^{m}[S_1^2+S_2^2+2S_1S_2\cos(2b_lZ_0)][D_G^l(\alpha)]^2, \tag{10}$$

$$S_{1,2} = \frac{\sin\left[N_2\frac{d}{2}(b_l \mp k_K\sin\gamma)\right]}{N_2\sin\left[\frac{d}{2}(b_l \mp k_K\sin\gamma)\right]}, \tag{11}$$

$$D_G^l = \frac{\sin\left[N_1\frac{d}{2}(\xi_l\sin\alpha - k_K\cos\gamma\sin\beta)\right]}{N_1\sin\left[\frac{d}{2}(\xi_l\sin\alpha - k_K\cos\gamma\sin\beta)\right]}. \tag{12}$$

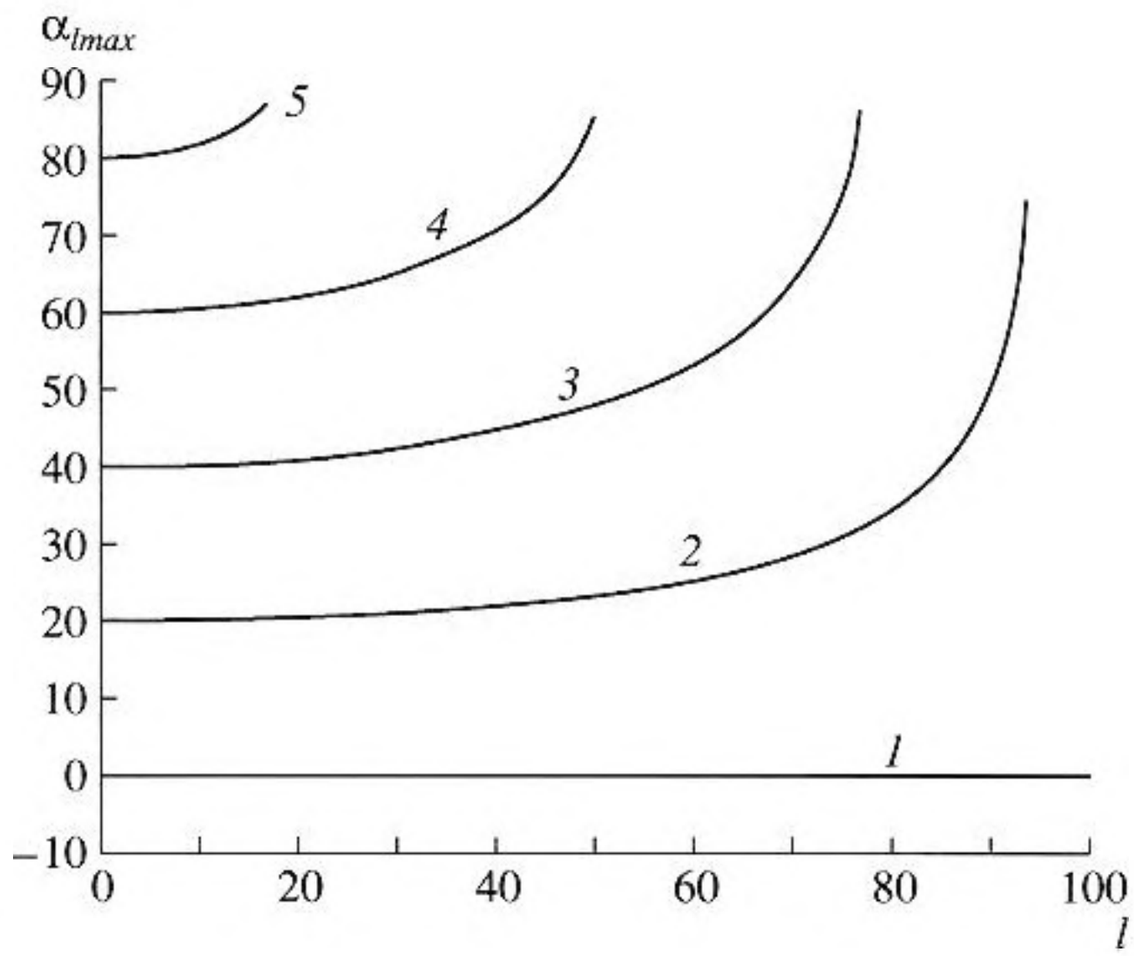

Рис. 2. Зависимость углового положения главного максимума $\alpha_{l\max}$ парциальной диаграммы горизонтальной линейной антенны в водном слое D_l от номера нормальной волны *l* при различных значениях угла компенсации β. β = 0°, 20°, 40°, 60°, 80° – кривые *1–5*.

Компенсатор антенны позволяет сканировать ее диаграммой как в горизонтальной плоскости – угол β, так и в вертикальной – угол γ. Угол γ отсчитывается от горизонтали в вертикальной плоскости (угол места). Z_0 – горизонт расположения центра антенны. (Центром считается точка пересечения диагоналей прямоугольника антенны.) N_1 означает число элементов по горизонтальной апертуре, а N_2 – по вертикальной. Плоскость антенны располагается перпендикулярно оси *R*. Предполагается, что N_1 и N_2 – нечетны. Шаг между соседними элементами по горизонтали и по вертикали составляет половину длины волны, $d = 0.5\lambda$.

Рисунок 3 иллюстрирует изменение формы кривой диаграммы направленности плоской прямоугольной вертикальной антенны при различных углах компенсации в горизонтальной плоскости β и различном числе горизонтальных рядов в вертикальной плоскости N_2. Как известно, направленность вертикальной антенны в волноводе проявляется в степени возбуждения нормальных волн различных номеров *l*. В случае горизонтальной ориентации диаграммы направленности антенны вдоль оси волновода γ = 0° будут возбуждаться в первую очередь нормальные волны первых номеров и с увеличением вертикальной апертуры антенны их число будет уменьшаться. Следствием этого будет уменьшение уровня и сжатие правой "столообразной" части диаграммы при ненулевых углах компенсации β вплоть до его исчезновения и приобретения диаграммой

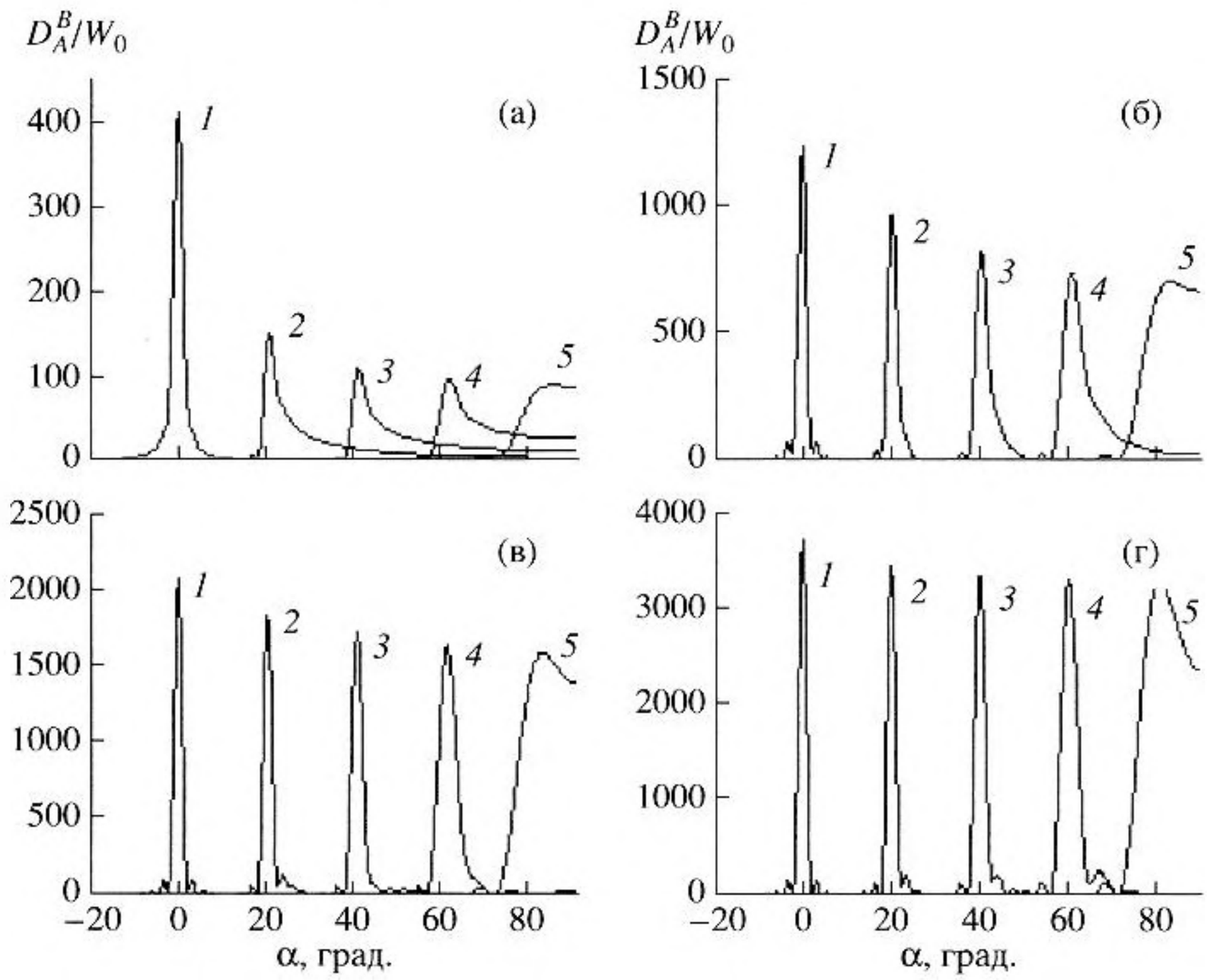

Рис. 3. Диаграммы направленности по мощности плоской прямоугольной вертикальной дискретной антенны в водном слое при различных углах компенсации β и различном числе горизонтальных рядов в вертикальной плоскости антенны N_2. $H = 50\lambda$, $m = 100$, $d = 0.5\lambda$, $Z_0 = 0.5H$, $N_1 = 51$, $\gamma = 0°$, $\beta = 0°, 20°, 40°, 60°, 80°$ – кривые *1–5*. а. $N_2 = 1$; б. $N_2 = 3$; в. $N_2 = 5$; г. $N_2 = 9$.

формы одного большого максимума при $\alpha = \beta$. Рис. 3 наглядно иллюстрирует этот эффект. Причем число горизонтальных решеток по вертикали достаточно взять равным трем $N_2 = 3$ при сканировании диаграммой направленности в горизонтальной плоскости до $\beta \cong 40°$ и $N_2 = 5$ до $\beta \cong 60°$. Таким образом, относительно небольшое развитие антенны по вертикали позволяет реализовать диаграмму направленности по мощности с одним основным максимумом в горизонтальной плоскости, то есть излучать звуковую энергию вдоль волновода в заданном направлении.

Выражение (7) может рассматриваться также как сканограмма направленности антенны по мощности, если азимутальный угол α постоянен, а меняется угол компенсации β. Другими словами, сканограмма направленности по мощности представляет собой зависимость потока мощности, излучаемого антенной в заданном направлении α, от угла компенсации β. Также возможна нормировка диаграммы на ее максимальное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. 278 с.
2. *Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю.* Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984. 300 с.
3. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.
4. *Кравцов Ю.А., Кузькин В.М.* Об излучении антенны в многомодовом волноводе с плавно меняющимися параметрами // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 2. С. 207–210.
5. *Середов А.М.* Поле распределенного гармонического источника в горизонтально стратифицированном волноводе // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 5. С. 642–646.
6. *Шарфарец Б.П.* Поле протяженного направленного излучателя в регулярном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 1. С. 132–137.
7. *Елисеевнин В.А.* Диаграмма направленности компенсированной излучающей горизонтальной линейной антенны в волноводе // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 468–472.
8. *Касаткин Б.А., Стаценко Л.Г.* Энергетические и полевые характеристики акустических антенн в волноводе. Владивосток: Дальнаука, 2000. 266 с.
9. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.

The Power Pattern of a Hydroacoustic Array in a Waveguide

E. V. Golubeva[a] and V. A. Eliseevnin[b]

[a] *Webb Institute, 298 Crescent Beach Road, Glen Cove, NY 11542, USA*
e-mail: egoloubeva@gmail.com

[b] *Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia*

Abstract—A definition of the directional pattern of a transmitting hydroacoustic array operating in a waveguide is introduced as the normalized azimuth dependence of the emitted power. Directional patterns of a horizontal linear array and a planar rectangular vertical array are considered as examples.