АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 2, с. 279 - 281

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534+534.231.2

КОЭФФИЦИЕНТ КОНЦЕНТРАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДИСКРЕТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ В ВОЛНОВОДЕ

© 1996 г. В. А. Елисеевнин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117086 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 01.03.95 г.

В целом ряде работ исследуется коэффициент концентрации гидроакустических антенн различных конструкций. При этом предполагается, что антенны находятся в однородном неограниченном пространстве. Наиболее полно результаты этих исследований отражены в монографии [1]. В работе [2] приводятся результаты расчетов коэффициента осевой концентрации горизонтальной линейной антенны в волноводе. При этом элементы на апертуре антенны располагаются так близко друг к другу, что ее можно рассматривать как непрерывную. Ниже исследуется коэффициент концентрации дискретной линейной антенны в волноводе в зависимости от расстояния между ее соседними элементами.

Дискретная эквидистантная линейная антенна с равномерным амплитудным возбуждением элементов располагается в волноводе горизонтально на глубине Z_0 и излучает монохроматический сигнал частоты ω. Будем считать число элементов антенны N нечетным, расстояние между соседними элементами (шаг антенны) обозначим через d. Антенна снабжена электронным компенсатором, позволяющим сканировать ее диаграмму на заданный угол компенсации β. В качестве волновода рассматривается однородный водный слой толщины H с плоскопараллельными абсолютно отражающими границами – верхняя поверхность мягкая, дно жесткое. Звуковое поле представляется в виде суммы нормальных волн [3].

Определяя коэффициент осевой концентрации горизонтальной дискретной линейной антенны в волноводе K_B как отношение акустических мощностей ненаправленного и направленного источников, создающих в некоторой точке волновода на оси главного максимума диаграммы в дальнем поле антенны одинаковую интенсивность, получаем (подробный вывод формулы и обоснование правомерности применяемой нормировки коэффициента осевой концентрации приводится в работе [2], а определение границы дальней зоны антенны в волноводе в работе [4])

$$K_B = \frac{\pi \sum\limits_{l=1}^{m} \cos^2(b_l Z_0)}{\sum\limits_{l=1}^{m} \cos^2(b_l Z_0) \int\limits_{-\pi/2}^{+\pi/2} D_l^2(\alpha) d\alpha}, \qquad (1)$$

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

Здесь $D_l(\alpha)$ представляет собой парциальную диаграмму направленности одной l-ой нормальной волны, излучаемой дискретной антенной; ξ_l и b_l – горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора l-ой нормальной волны; m – число нормальных волн, распространяющихся в волноводе без затухания; α – угол в горизонтальной плоскости между нормалью к центру антенны и направлением в заданную точку волновода; $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – волновое число, C – скорость звука в водной толще, λ – длина звуковой волны.

Поведение коэффициента концентрации дискретной эквидистантной линейной антенны в волноводе при шаге $d \le 0.5\lambda$ в зависимости от различных параметров антенны и волновода, по-видимому, будет аналогично его поведению для непрерывной антенны той же апертуры. Различия следует ожидать тогда, когда шаг антенны будет близок или больше длины волны λ и на кривой ее диаграммы направленности возникнут вторичные дифракционные максимумы [1].

Рассмотрение закономерностей в поведении коэффициента концентрации антенны K_B при изменении величины ее шага d удобно проводить, иллюстрируя рассуждения конкретным примером. Возьмем антенну из $N = 11$ элементов и поместим ее в волновод толщиной $H = \lambda$ на дно $Z_0 = 0$. В таком волноводе без затухания распространяются две нормальные волны, $m = 2$. Положим

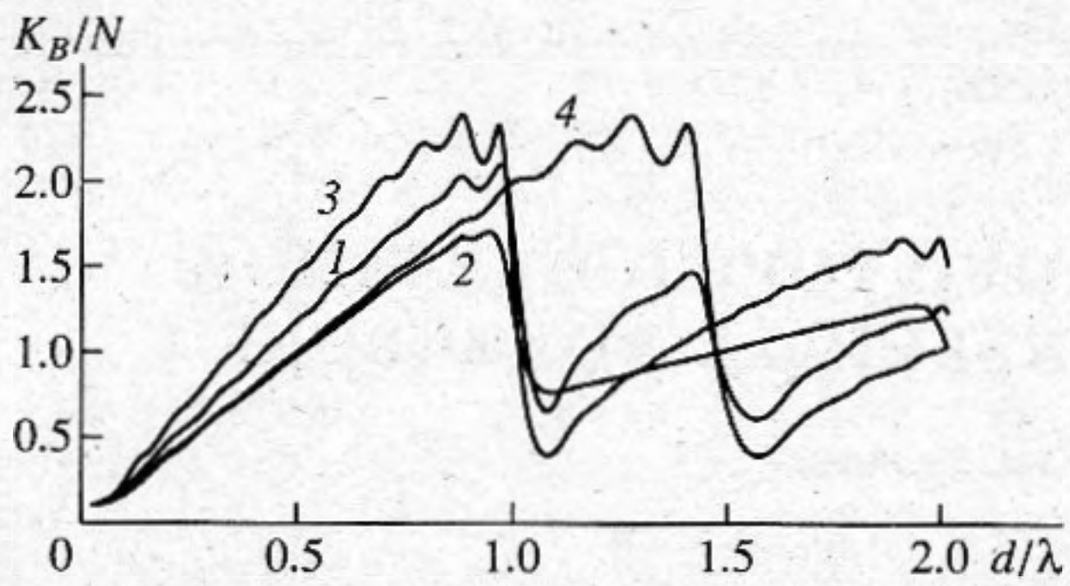

Рис. 1. Коэффициент концентрации горизонтальной дискретной линейной антенны в волноводе K_B в зависимости от расстояния между элементами d/λ. $N = 11$, $H = \lambda$, $Z_0 = 0$. *1* – $m = 2$, *2* – антенна в свободном пространстве, *3* – $l = 1$, *4* – $l = 2$.

угол компенсации β равным 0°. Результаты расчета коэффициента осевой концентрации такой антенны в волноводе представлены на рис. 1 (кривая *1*). По оси абсцисс отложены расстояния между соседними элементами в длинах волн d/λ, по оси ординат – коэффициент концентрации, нормированный к числу элементов антенны, K_B/N.

Для сравнения на том же рис. 1 представлена зависимость коэффициента концентрации K от шага d/λ той же антенны, находящейся в однородном неограниченном пространстве (кривая *2*). При этом коэффициент концентрации рассчитывался по формуле [1]

$$K = N^2\left[N + 2\sum_{i=1}^{N-1}(N-i)\times\right.$$
$$\left.\times\cos\left(2\pi\frac{d}{\lambda}i\sin\beta\right)\frac{\sin\left(2\pi\frac{d}{\lambda}i\right)}{2\pi\frac{d}{\lambda}i}\right]^{-1}. \quad (3)$$

Согласно рис. 1, начиная с $d \simeq 0.1\lambda$ и до $d \simeq 0.8\lambda$ величины коэффициентов концентрации K_B и K растут почти линейно хотя и под разными углами наклона (угол наклона K_B больше угла наклона K). С ростом шага антенны d/λ увеличивается ее апертура, что и определяет линейный рост коэффициента концентрации [1, 2]. Далее наступает почти одновременный резкий спад обеих кривых и затем опять рост с увеличением d/λ, линейный для K и нелинейный для K_B, но уже под меньшими углами наклона.

Диаграмма направленности дискретной линейной антенны в свободном пространстве с шагом $d \leq 0.5\lambda$ обладает одним главным максимумом, равным единице. С увеличением шага антенны на ее диаграмме появляются дополнительные боковые лепестки, равные по амплитуде главному, так называемые единичные боковые лепестки или дифракционные максимумы [1]. Углы α_M, соответствующие этим дифракционным максимумам, определяются из условия

$$\sin\alpha_M = \sin\beta \pm k\frac{\lambda}{d}, \quad k = 1, 2, 3\ldots \quad (4)$$

(Здесь знак плюс берется для углов α_M, находящихся справа от угла компенсации β, а знак минус – для углов слева.)

В случае дискретной антенны, располагающейся в волноводе горизонтально, картина усложняется. Каждая излучаемая антенной нормальная волна номера l характеризуется своей фазовой скоростью C_l, горизонтальной компонентой волнового числа ξ_l и соответствующей ей длиной волны λ_l. Все эти величины отличаются от аналогичных величин для плоской волны в свободном пространстве C, k и λ. На кривой парциальной диаграммы направленности для l-ой нормальной волны $D_l(\alpha)$ с увеличением шага антенны будут появляться дифракционные максимумы под углами, определяемыми из условия

$$\sin\alpha_M^l = \frac{k}{\xi_l}\sin\beta \pm k\frac{\lambda_l}{d}, \quad k = 1, 2, 3, \ldots \quad (5)$$

$$\lambda_l = \lambda\Big/\left[1 - \left(\frac{l-0.5}{2\frac{H}{\lambda}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Это условие можно получить, приравняв нулю знаменатель выражения (2). Условие (5) означает, что для каждой нормальной волны дифракционные максимумы возникают при различных величинах шага антенны d/λ.

Возвращаясь к рис. 1, видим, что для $K = 1$ (формула (5)) дифракционные максимумы первой и второй нормальных волн достигают единичного значения при шаге антенны d, равном соответственно 1.033λ и 1.43λ. Резкий спад на кривой *1*, обязанный появлению дифракционного максимума первой нормальной волны, практически совпадает со спадом на кривой *2*, поскольку дифракционный максимум диаграммы той же антенны в свободном пространстве достигает единичного значения при $d = \lambda$. Второй спад на кривой *1* наступает, когда шаг антенны достигает значения $d = 1.43\lambda$, соответствующего появлению дифракционного максимума для второй нормальной волны.

Зависимости парциальных коэффициентов концентрации антенны в волноводе по характеру

поведения будут близки к аналогичным зависимостям коэффициента концентрации антенны в свободном пространстве K от ее шага d/λ. По аналогии с приводимым выше определением коэффициента концентрации антенны в волноводе при излучении m нормальных волн парциальный коэффициент концентрации определяется при излучении антенной только одной l-й нормальной волны:

$$K_B^l = \frac{\pi}{\int\limits_{-\pi/2}^{+\pi/2} D_l^2(\alpha)d\alpha}. \qquad (6)$$

Кривыми *3* и *4* рис. 1 представлены зависимости парциальных коэффициентов концентрации K_B^l от шага антенны d/λ для первой и второй нормальных волн соответственно. Сравнение их с кривой *1* поясняет характер ее поведения – равномерные подъемы и резкие спады.

Выше был рассмотрен случай излучения двух нормальных волн. Согласно (5) при большом числе излучаемых антенной нормальных волн соответствующие им дифракционные максимумы будут возникать при различных значениях d/λ и кривая $K_B(d/\lambda)$ принимает неравномерный характер. На рис. 2 представлены зависимости $K_B(d/\lambda)$ той же антенны для случая распространения в волноводе пяти и двадцати нормальных волн (кривые *1* и *2*). На том же рисунке представлена зависимость $K(d/\lambda)$ той же антенны для свободного пространства (кривая *3*). При значениях $d \le \lambda$ кривые *1* и *2* носят линейный характер (как и кривая *3*) и после резкого спада вблизи значения $d \simeq \lambda$ и при $d > \lambda$ они принимают неравномерный характер. С увеличением числа нормальных волн кривая коэффициента концентрации антенны в волноводе $K_B(d/\lambda)$ приближается к кривой коэффициента концентрации той же антенны в свободном пространстве $K(d/\lambda)$.

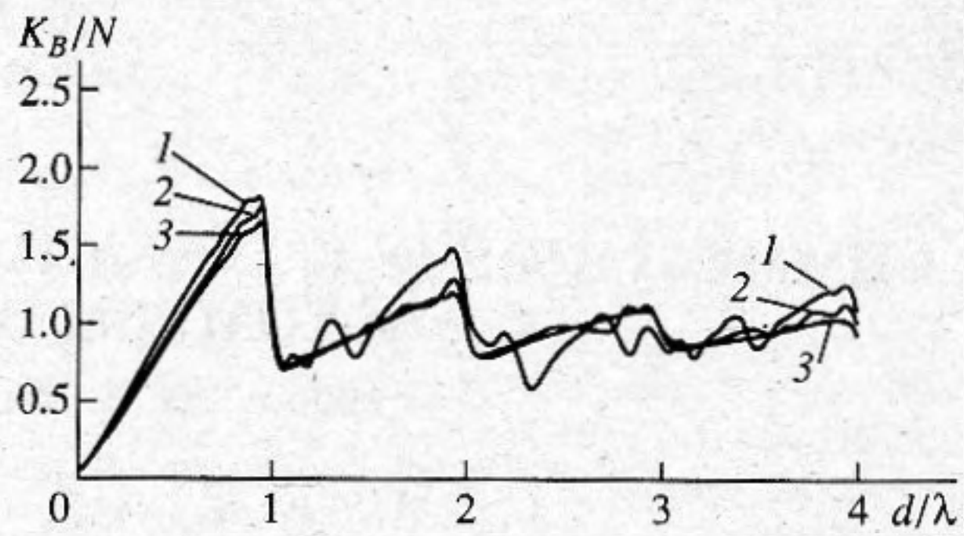

Рис. 2. Коэффициент концентрации горизонтальной дискретной линейной антенны в волноводе K_B в зависимости от расстояния между элементами d/λ. $N = 11$, $Z_0 = 0$, *1* – $H = 2.5\lambda$, $m = 5$, *2* – $H = 10\lambda$, $m = 20$, *3* – антенна в свободном пространстве.

В случае, когда антенна располагается в слоистом волноводе с абсолютно отражающим дном (в отличие от рассмотренного выше идеального волновода), в поведении коэффициента концентрации $K_B(d/\lambda)$ следует ожидать лишь некоторых количественных изменений. Качественные изменения могут наступить в случае волновода с импедансным дном, когда наряду с полем нормальных волн возникнет поле боковой волны [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
2. *Елисеевнин В.А.* Коэффициент концентрации горизонтальной линейной антенны в волноводе // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 794 - 798.
3. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
4. *Елисеевнин В.А.* Граница между ближним и дальним полем антенны в волноводе // Акуст. журн. 1993. Т. 39. Вып. 1. С. 172 - 173.