

КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ

УДК 534+534.231.2

О ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРЕМЫ УМНОЖЕНИЯ К РАСЧЕТУ
ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН В ВОЛНОВОДЕ

© 1995 г. В. А. Елисеевнин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 15.12.94 г.

В теории направленности антенн [1, 2] имеет место так называемая теорема умножения, часто используемая при расчетах гидроакустических антенных систем. Согласно этой теореме характеристика направленности антенны, состоящей из одинаковых и одинаково ориентированных в пространстве элементов, равна произведению характеристик направленности каждого элемента и гипотетической антенной решетки из ненаправленных элементов, расположенных в центрах элементов рассматриваемой антенны. При этом предполагается, что антенна находится в однородном неограниченном пространстве. Вопрос о правомерности использования теоремы умножения при расчетах характеристик направленности антенных систем в волноводах ранее не рассматривался. Результаты исследования этого вопроса приводятся ниже.

Рассмотрение проведем на примере приемной линейной антенны, которая последовательно занимает в волноводе горизонтальное, а затем вертикальное положение. Обратимся к первому случаю. Звуковое поле в слоисто-неоднородном волноводе с мягкой поверхностью и жестким дном создается точечным ненаправленным монохроматическим источником и представляется в виде суммы нормальных волн [3]. Прием осуществляется на горизонтальную линейную антенну, состоящую из нечетного числа N линейных элементов, каждый длиной L , расположенных вдоль оси x на некотором расстоянии друг от друга. Расстояние между центрами двух соседних элементов равно d . Источник находится в дальнем поле антенны. Антенна снабжена электронным компенсатором, позволяющим сканировать диаграммой направленности антенной решетки в горизонтальной плоскости на заданный угол β путем введения линейных фазовых задержек в канале каждого ее элемента относительно ее центра. В целях упрощения задачи будем считать, что компенсация внутри каждого элемента антенны отсутствует. Тогда сигнал на выходе антенны будет пропорционален величине:

$$u_a^r = \sum_{i=-m}^m \left[\int_{id-L/2}^{id+L/2} u_x(x) dx \right] e^{-jkid \sin \beta}, \quad (1)$$

где k – волновое число, $m = (N-1)/2$, u_x – звуковой потенциал поля в заданной точке волновода на оси x , представимый в виде суммы нормальных волн:

$$u_x(x) = \sum_{l=1}^K A_l e^{j\xi_l(R+x \sin \alpha)}. \quad (2)$$

Здесь ξ_l – горизонтальная компонента волнового вектора l -й нормальной волны; R – расстояние по горизонтали от источника до центра антенны; α – угол в горизонтальной плоскости между нормалью к антенне и направлением на источник из центра антенны, K – число нормальных волн, распространяющихся в волноводе без затухания. Величина A_l характеризует степень возбуждения l -й нормальной волны и определяется собственными функциями и собственными значениями соответствующей задачи Штурма–Лиувилля с заданными граничными условиями [3].

Подставляя (2) в (1) и производя необходимые преобразования, получаем выражение для ненормированной диаграммы направленности (отклика) антенны:

$$u_a^r = LN \sum_{l=1}^K A_l e^{j\xi_l R} D_s^r(\alpha) D_p^r(\alpha, \beta), \quad (3)$$

$$D_s^r(\alpha) = \frac{\sin \left(\frac{L}{2} \xi_l \sin \alpha \right)}{\frac{L}{2} \xi_l \sin \alpha}, \quad (4)$$

$$D_p^r(\alpha, \beta) = \frac{\sin \left[N \frac{d}{2} (\xi_l \sin \alpha - k \sin \beta) \right]}{N \sin \left[\frac{d}{2} (\xi_l \sin \alpha - k \sin \beta) \right]}. \quad (5)$$

Здесь D_s^r и D_p^r – диаграммы направленности одного элемента и антенной решетки соответственно. Величина $\exp(j\xi_l R)$ определяет набег фазы при распространении l -й нормальной волны от источника до центра антенны. В работах [4 - 6] исследовалась диаграмма направленности горизонтальной непрерывной линейной антенны в

волноводе, представляемая в виде суммы диаграмм при приеме каждой из нормальных волн в отдельности, так называемых парциальных диаграмм.

Поместим теперь антенну в волноводе вертикально с центром на горизонте Z на расстоянии R от источника. В качестве волновода будем рассматривать однородный водный слой с мягкой поверхностью и жестким дном (идеальный волновод). Угол компенсации β теперь будет отсчитываться в вертикальной плоскости от горизонтали. Сигнал на выходе антенны будет определяться выражением:

$$u_a^B = \sum_{i=-m}^m \left(\int_{Z+id-L/2}^{Z+id+L/2} u_z(z) dz \right) e^{-jkid \sin \beta}. \quad (6)$$

Звуковой потенциал поля на антенне на горизонте z имеет вид:

$$u_z(z) = \sum_{l=1}^K B_l e^{j\xi_l R} \cos(b_l z). \quad (7)$$

Здесь B_l — величина, характеризующая степень возбуждения l -й нормальной волны, b_l — вертикальная компонента волнового вектора l -й нормальной волны. После подстановки (7) в (6) и соответствующих преобразований получаем выражение для отклика антенны, располагающейся в волноводе вертикально:

$$u_a^B = \frac{1}{2} LN \sum_{l=1}^K B_l e^{j\xi_l R} D_s^B D_p^B(\beta), \quad (8)$$

$$D_s^B = \frac{\sin(b_l \frac{L}{2})}{b_l \frac{L}{2}}, \quad (9)$$

$$D_p^B = e^{jb_l Z} S_1 + e^{-jb_l Z} S_2, \quad (10)$$

$$S_{1,2} = \frac{\sin \left[N \frac{d}{2} (b_l \mp k \sin \beta) \right]}{N \sin \left[\frac{d}{2} (b_l \mp k \sin \beta) \right]}. \quad (11)$$

В правой части последнего выражения знак минус относится к S_1 , а знак плюс — к S_2 . S_1 и S_2 представляют собой отклики антенной решетки на лучи Бриллюэна l -й нормальной волны [3]. Если учесть, что $b_l = k \sin \beta_l$, где β_l — угол скожения лучей Бриллюэна l -й нормальной волны, то величины D_s^B и D_p^B являются откликом одного элемента и антенной решетки соответственно. Отклик непрерывной вертикальной линейной антенны в волноводе исследовался в работах [6, 7].

Таким образом, как следует из выражений (3) и (8), в случае антенны в волноводе теорема умножения применима при расчете характеристик направленности только каждой из парциальных диаграмм в отдельности. В случае, когда в волноводе распространяется несколько нормальных волн, теорема умножения к расчету общей (суммарной) характеристики направленности антенны не применима. В этом случае диаграмма направленности рассмотренной выше антенны в волноводе не равна произведению диаграммы направленности каждого ее элемента в волноводе на диаграмму направленности дискретной эквидистантной антенной решетки из ненаправленных элементов, располагающихся в центрах элементов реальной антенны, в волноводе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смарышев М.Д.* Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.
2. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990.
3. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
4. *Елисеевнин В.А.* О работе горизонтальной линейной антенны в водном слое // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 2. С. 227 - 233.
5. *Елисеевнин В.А.* О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 1. С. 44 - 49.
6. *Кравцов Ю.А., Кузькин В.М.* Об излучении антенны в многомодовом волноводе с плавноменяющимися параметрами // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 2. С. 207 - 210.
7. *Елисеевнин В.А.* О работе вертикальной линейной антенны в водном слое // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 2. С. 228 - 233.