

УДК 534.232

ОБ ОТКЛИКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Щекин И. Е.

Рассмотрены определение и расчет отклика сфокусированной горизонтальной антенны в ближней зоне в однородном водном слое, лежащем на жидком полупространстве. Звуковое поле в слое создается точечным ненаправленным монохроматическим источником.

В настоящее время повысился интерес к методам определения направленных свойств антенны в ближней зоне. Одним из них является метод фокусировки, позволяющий воспроизвести вблизи антенны поле ее дальней зоны и определить ее характеристику направленности.

В работе [1] рассмотрена направленность линейной антенны, помещенной в однородный водный слой с абсолютно отражающими границами для случая, когда источник звука находится в дальней зоне антенны. Поле в слое представлялось в виде суммы нормальных волн. Работы [2, 3] посвящены определению диаграмм направленности сфокусированных антенн по результатам измерений в ближней зоне в свободном пространстве. В этих работах было показано, что поле сфокусированных апертур совпадает в окрестности фокуса с полем дальней зоны несфокусированных апертур.

Данная работа посвящена исследованию направленных свойств сфокусированной эквидистантной горизонтальной антенны в ближней зоне в однородном водном слое, сверху ограниченном свободной поверхностью, снизу дном, характеризующимся плотностью  $\rho_1$ , скоростью распространения звука  $c_1$ , затуханием звука  $\alpha$ . Горизонтальная антенна, состоящая из  $N$  точечных ненаправленных звукоприемников одинаковой чувствительности, расположенных эквидистантно, находится в плоском слое воды с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$ . Звуковое поле в слое создается точечным ненаправленным источником, излучающим тональный сигнал.

Направленные свойства антенны характеризуются ее откликом, который описывается функцией

$$R(\varphi, \varphi_0) = |P|/|P|_{\max}, \tag{1}$$

где  $P$  — уровень сигнала, принимаемого антенной в водном слое,  $\varphi$  — угол между осью антенны и прямой, соединяющей центр антенны с точкой наблюдения,  $\varphi_0$  — угол компенсации.

Расчет звукового поля в водном слое проведем методом мнимых источников [4]. Тогда для сигнала, принимаемого антенной, получим следующее выражение:

$$P = A_1 \sum_{\xi=1}^N \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{i=1}^4 \frac{V_{\xi v i}}{R_{\xi v i}} \exp(jkR_{\xi v i} + B_i), \tag{2}$$

где  $A_1$  — величина, пропорциональная производительности источника, частоте излучения и плотности жидкости,  $V_{\xi v 1} = (-1)^v [V(\theta_{\xi v 1})]^v$ ,  $V_{\xi v 2} = (-1)^{v+1} [V(\theta_{\xi v 2})]^{v+1}$ ,  $V_{\xi v 3} = (-1)^v [V(\theta_{\xi v 3})]^v$ ,  $V_{\xi v 4} = (-1)^{v+1} [V(\theta_{\xi v 4})]^{v+1}$ ,  $R_{\xi v i} = [(x-x_{\xi})^2 + y^2 + z_{v i}^2]^{1/2}$ ,  $B_1 = j[v\varphi(\theta_{\xi v 1}) - kd(\xi-1)\sin\varphi_0]$ ,  $B_2 = j[(v+1)\varphi - (\theta_{\xi v 2}) - kd(\xi-1)\sin\varphi_0]$ ,  $B_3 = j[v\varphi(\theta_{\xi v 3}) - kd(\xi-1)\sin\varphi_0]$ ,  $B_4 = j[(v+1)\varphi - (\theta_{\xi v 4}) - kd(\xi-1)\sin\varphi_0]$ ,  $z_{v 1} = 2Hv + z - z_0$ ,  $z_{v 2} = 2Hv + z + z_0$ ,  $z_{v 3} = 2(v+1)H - z - z_0$ ,  $z_{v 4} = 2(v+1)H - z + z_0$ ,  $H$  — толщина слоя;  $k = \omega/c$  — волновое число;  $x_{\xi}$ ,  $0$ ,  $z_0$  — координаты  $\xi$ -го приемника;  $x_{\xi} = d(N+1)/(2-\xi)$ ;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — координаты источника,  $d$  — расстояние между приемниками,  $\omega$  — круговая ча-

стота,  $R_{\xi vi}$  — расстояния от  $\xi$ -го приемника антенны до источника и его отображений от свободной поверхности и дна; коэффициент отражения от дна представлен в форме Френеля [4];  $V(\theta_{\xi vi})$ ,  $\varphi(\theta_{\xi vi})$  — модули и фазы коэффициентов отражений от дна, которые являются функциями углов падения  $\theta_{\xi vi}$ ,

$$V(\theta_{\xi vi}) = \left[ \frac{(m \cos \theta_{\xi vi} - M_2)^2 + M_1^2}{(m \cos \theta_{\xi vi} + M_2) + M_1^2} \right]^{1/2}, \quad m = \rho_1 / \rho,$$

$$M_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{A^2 + B^2} \pm A}, \quad \sin^2 \theta_{\xi vi} - n^2 = A - jB, \quad A = \sin^2 \theta_{\xi vi} - n_0^2 (1 - \alpha^2),$$

$$B = 2n_0^2 \alpha, \quad n = n_0 (1 + j\alpha), \quad \alpha > 0, \quad n_0 = c/c_1,$$

$$\varphi(\theta_{\xi vi}) = \arctg \frac{2M_1 \cos \theta_{\xi vi}}{m^2 \cos^2 \theta_{\xi vi} - M_1^2 - M_2^2}, \quad \theta_{\xi vi} = \arctg \{ y^2 + [x - d(N-1)/2 + d(\xi-1)]^2 z_{vi}^{-2} \}^{1/2}.$$

Вводя в плоскости  $x, y$  полярные координаты  $x = R \cos \varphi$ ,  $y = R \sin \varphi$ , где  $R$  — расстояние от центра антенны до точки наблюдения по горизонтали, получаем

$$R_{\xi vi} = [R^2 - 2Rx_{\xi} \cos \varphi + x_{\xi}^2 + z_{vi}^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Выражение (3) может быть представлено в виде ряда по степеням  $x_{\xi}/R$ :

$$R_{\xi vi} = R \sqrt{1 + b_i} - \frac{x_{\xi} \cos \varphi}{\sqrt{1 + b_i}} + \frac{x_{\xi}^2}{2R \sqrt{1 + b_i}} \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi}{1 + b_i} \right) + \frac{x_{\xi}^3 \cos \varphi}{2R^2 (1 + b_i)^{3/2}} \left( 1 - \frac{\cos^2 \varphi}{1 + b_i} \right) + \dots, \quad b_i = z_{vi}^2 / R^2. \quad (4)$$

В дальней зоне допустима замена  $R_{\xi vi}$  в показателе экспоненты (2) двумя первыми членами разложения (4), так что при нахождении источника в дальней зоне сигнал, принимаемый антенной, можно представить в виде

$$P = A_1 \sum_{\xi=1}^N \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{i=1}^4 \frac{V_{\xi vi}}{R_{\xi vi}} \exp \left[ jk \left( R \sqrt{1 + b_i} - \frac{x_{\xi} \cos \varphi}{\sqrt{1 + b_i}} \right) + B_i \right]. \quad (5)$$

При этом граница дальней зоны определяется из условия, что фазовая ошибка, связанная с отброшенными членами, не должна превышать  $\pi/8$  [5]. Тогда границей этой зоны будет расстояние  $l = 2(N-1)^2 d^2 / \lambda$ .

Полученное выражение (5) отличается от (2) только показателями экспонент. Метод фокусировки заключается в том, чтобы скомпенсировать это отличие введением дополнительного корректирующего фазового распределения  $\varepsilon_{\xi vi}$ . Тогда для любого направления  $\varphi_0$  и расстояния  $R$  подбирается такое  $\varepsilon_{\xi vi}$ , чтобы уровни сигналов, принимаемые антенной при нахождении источника звука в ближней и дальней зонах, совпадали. Следовательно,  $\varepsilon_{\xi vi}$  должно иметь вид

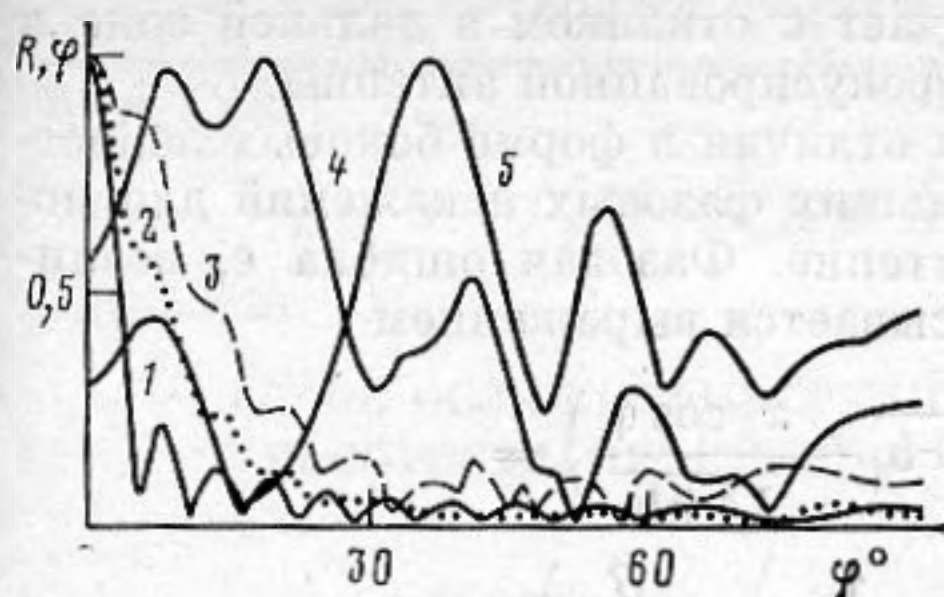
$$\varepsilon_{\xi vi} = k \left( R \sqrt{1 + b_i} - \frac{x_{\xi} \cos \varphi_0}{\sqrt{1 + b_i}} - R_{\xi vi0} \right), \quad (6)$$

где  $R_{\xi vi0} = (R^2 - 2Rx_{\xi} \cos \varphi_0 + x_{\xi}^2 + z_{vi}^2)^{1/2}$ . Для сигнала, принимаемого антенной, в этом случае будем иметь следующее выражение:

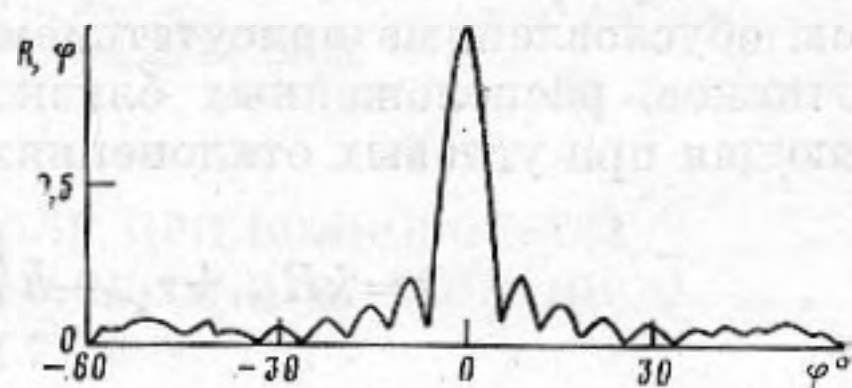
$$P_1 = A_1 \sum_{\xi=1}^N \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{i=1}^4 \frac{V_{\xi vi}}{R_{\xi vi}} \exp [jkR_{\xi vi} + j\varepsilon_{\xi vi} + B_i]. \quad (7)$$

В частном случае, когда источник звука находится на нормали к апертуре, проведенной через ее центр, фазовая коррекция имеет вид

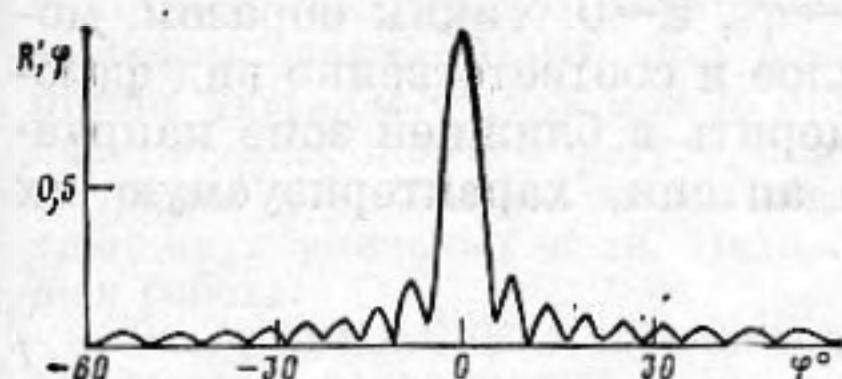
$$\varepsilon_{\xi vi} = k (R \sqrt{1 + b_i} - \sqrt{R^2 + x_{\xi}^2 + z_{vi}^2}). \quad (8)$$



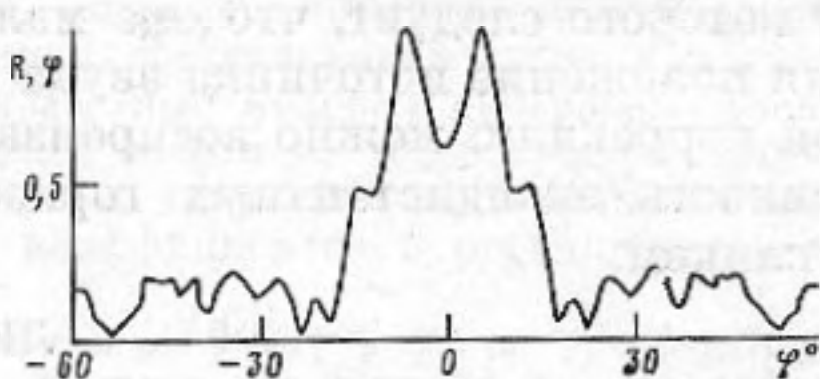
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 1. Отклик антенны  $R(\varphi)$  в водном слое. 1 —  $R=15\,000$  м, 2 —  $R=1000$ , 3 —  $R=750$ , 4 —  $R=500$ , 5 —  $R=250$  м. 1–5 рассчитаны соответственно для расстояний  $500\lambda$  (дальняя зона),  $33,3\lambda$ ,  $25\lambda$ ,  $16,6\lambda$  и  $8,3\lambda$  (ближняя зона)

Фиг. 2. Отклик сфокусированной антенны при  $R=0,083L^2/\lambda$

Фиг. 3. Отклик несфокусированной антенны при  $R=4L^2/\lambda$  — дальняя зона

Фиг. 4. Отклик несфокусированной антенны при  $R=0,083L^2/\lambda$  (несфокусированная антенна, формула (1))

При больших расстояниях от антенны можно принять

$$\varepsilon_{\xi\nu i} \approx -kx_{\xi} / (2R\sqrt{1+b_i}). \quad (9)$$

Возможность замены (8) на (9) рассматривается как ограничение на применимость метода фокусировки. В этом случае фокусировка возможна при  $R_{\min} > (N-1)d[2d(N-1)/\lambda]^{1/2} / (4\sqrt{1+b_i})$ . Это ограничение, естественно, отсутствует, если корректирующее фазовое распределение  $\varepsilon_{\xi\nu i}$  имеет общий вид (6), (8).

Подставляя (7) в (1) вместо  $P$ , получим выражение для отклика горизонтальной эквидистантной антенны в ближней зоне в водном слое

$$R(\varphi, \varphi_0) = |P_1| / |P_1|_{\max}. \quad (10)$$

Проведем анализ численного расчета по формулам (1), (10) откликов несфокусированной и сфокусированной в ближней зоне эквидистантной горизонтальной антенны длиной  $L=10\lambda$ , находящейся на глубине  $h=3,33\lambda$  водного слоя толщиной  $H=6,66\lambda$ ,  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c=1500$  м/с,  $\rho_1=1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2500$  м/с,  $\alpha=0$ ,  $N=21$ ,  $\varphi_0=0$ ,  $z=\lambda$ ,  $d=\lambda/2$ .

На фиг. 1 показана зависимость структуры отклика от угла  $\varphi$  при некоторых фиксированных расстояниях от антенны до источника звука, рассчитанная по формуле (1). Результаты расчетов показывают, что отклик антенны при нахождении источника звука в зоне Фраунгофера имеет такую же угловую зависимость, как и характеристика направленности антенны в безграничной жидкости. При уменьшении расстояния от источника звука до антенны главный максимум и боковые лепестки откликов сильно деформируются. Это не позволяет определить и измерить направленность антенны в ближней зоне, не сфокусировав ее.

На фиг. 2 приведены результаты расчета по формуле (10) отклика сфокусированной антенны при аналогичных условиях. Из рассмотрения приведенных кривых следует, что отклик антенны, сфокусированной на

расстояние  $R=0,083L^2/\lambda$ , хорошо совпадает с откликом в дальней зоне и существенно отличается от отклика несфокусированной антенны.

Между кривыми фиг. 2 и 3 имеются отличия в форме боковых лепестков, обусловленные присутствием небольших фазовых искажений для источников, расположенных близко к антенне. Фазовая ошибка  $\varepsilon$ , возникающая при угловых отклонениях, описывается выражением

$$\begin{aligned}\varepsilon &= kR_{\xi v i} + \varepsilon_{\xi v i} - k \left( R \sqrt{1+b_i} - \frac{x_{\xi} \cos \varphi}{\sqrt{1+b_i}} \right) = \\ &= kx_{\xi} (\cos \varphi - \cos \varphi_0) \left( \frac{1}{\sqrt{1+b_i}} - \frac{R}{R_{\xi v i 0}} \right),\end{aligned}$$

из которого следует, что она мала и при  $\varphi \rightarrow \varphi_0$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Таким образом, меняя положение источника звука в водном слое и соответственно вид фазовой коррекции, можно воспроизвести и измерить в ближней зоне направленность эквидистантных горизонтальных антенн, характеризуемую их откликом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеевнин В. А. О работе горизонтальной линейной антенны в водном слое.— Акуст. журн., 1979, т. 25, № 2, с. 227—233.
2. Джонсон Р. С., Экер Х. А., Холлис Д. С. Определение диаграмм направленности антенн по результатам измерений в ближней зоне.— ТИИЭР, 1973, т. 61, № 12, с. 5—37.
3. Вольперт А. Р. К измерению диаграмм направленности сфокусированных антенных решеток в ближней зоне.— В кн.: Антенны. М.: Связь, 1969, № 6, с. 79—88.
4. Бреховский Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
5. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т. 1, Пер. с англ./Под ред. Макарова Т. Т., Чаплина А. Ф. М.: Сов. радио, 1966.

Поступила в редакцию  
29.XI.1983