АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 5, с. 627–632

УДК 534+534.231.2

НАПРАВЛЕННОСТЬ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ В ВОЛНОВОДЕ ПРИ ЕЕ СЛАБОМ ОТКЛОНЕНИИ ОТ ВЕРТИКАЛИ

© 2002 г. **В. А. Елисеевнин, Ю. И. Тужилкин**

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail:bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 19.07.2001 г.

Исследуется азимутальная направленность протяженной линейной антенны в волноводе, возникающая при ее отклонении от вертикального положения под влиянием подводных течений. Рассматривается модовый состав и интерференционная структура поля, излучаемого такой наклонной антенной.

Вертикальные антенны широко применяются в экспериментах по распространению звука в океане. Не обладая направленностью по горизонтали, они дают возможность измерять вертикальные углы прихода сигналов и определять их модовый состав, что является основой для нахождения расстояния до источника звука и его глубины методами согласованного поля [1] или согласованных диаграмм [2]. Вертикальная антенна удобна для использования в эксперименте. Она может быть опущена с борта судна или закреплена на якоре. Ее вертикальное положение поддерживается достаточной массой груза или плавучестью подповерхностного буя.

Трудности возникают при наличии подводных течений, нарушающих форму антенны. Тогда экспериментальную аппаратуру требуется дополнять системой определения формы антенны, что обычно существенно усложняет эксперимент [3]. Результаты исследований методов определения формы антенны с учетом реальных мешающих факторов приведены в работе [4]. Влияние наклона антенны на эффективность приема сигналов рассмотрено в [5]. При обработке учитываются данные о смещениях элементов антенны в плоскости, содержащей источник. Более простыми путями, позволяющими снизить влияние искажений формы приемной антенны в частных случаях, являются использование специальных многочастотных сигналов [6] и применение кепстрального анализа [7].

Задача становится более сложной, если источником служит вертикальная излучающая антенна, также подверженная деформации. Такая антенна использовалась в экспериментах Купермана и др. по обращению волнового фронта [8, 9]. В них сигнал от источника принимался удаленной вертикальной антенной и переизлучался ею в обратном времени, что обеспечивало его концентрацию в области вблизи излучателя. Контроль этой области выполнялся другой вертикальной антенной.

Трудности усугубляются, если переизлучающих антенн или отражателей несколько или азимут на них неизвестен. В этом случае излучающая антенна должна быть ненаправленной по азимуту, несмотря на ее отклонение от вертикали. В отличие от приемной антенны, информацию от которой можно обрабатывать параллельно с учетом отклонений ее элементов по всем значениям азимута, скомпенсировать передающую антенну для одновременного ненаправленного излучения в горизонтальной плоскости теоретически невозможно. В связи с этим представляет интерес задача о направленности по азимуту деформированной вертикальной антенны.

В настоящей работе рассмотрен простейший вид деформации – отклонение линейной антенны от вертикали без нарушения ее формы и простейший вид волновода – однородный водный слой с мягкой верхней и жесткой нижней границами. Не претендуя на универсальность результатов, такой подход позволяет показать основные черты явления.

В отсутствии течений линейная антенна, будучи заякоренной на дне и растянутая притопленной плавучестью у поверхности, принимает вертикальное положение, перекрывая своей апертурой всю толщину волновода H. Излучаемое ею звуковое поле представляется в виде суммы конечного числа мод (нормальных волн), распространяющихся в волноводе без затухания [10]. С целью излучения только одной моды на апертуре антенны задается распределение чувствительности ее элементов, пропорциональное распределе-

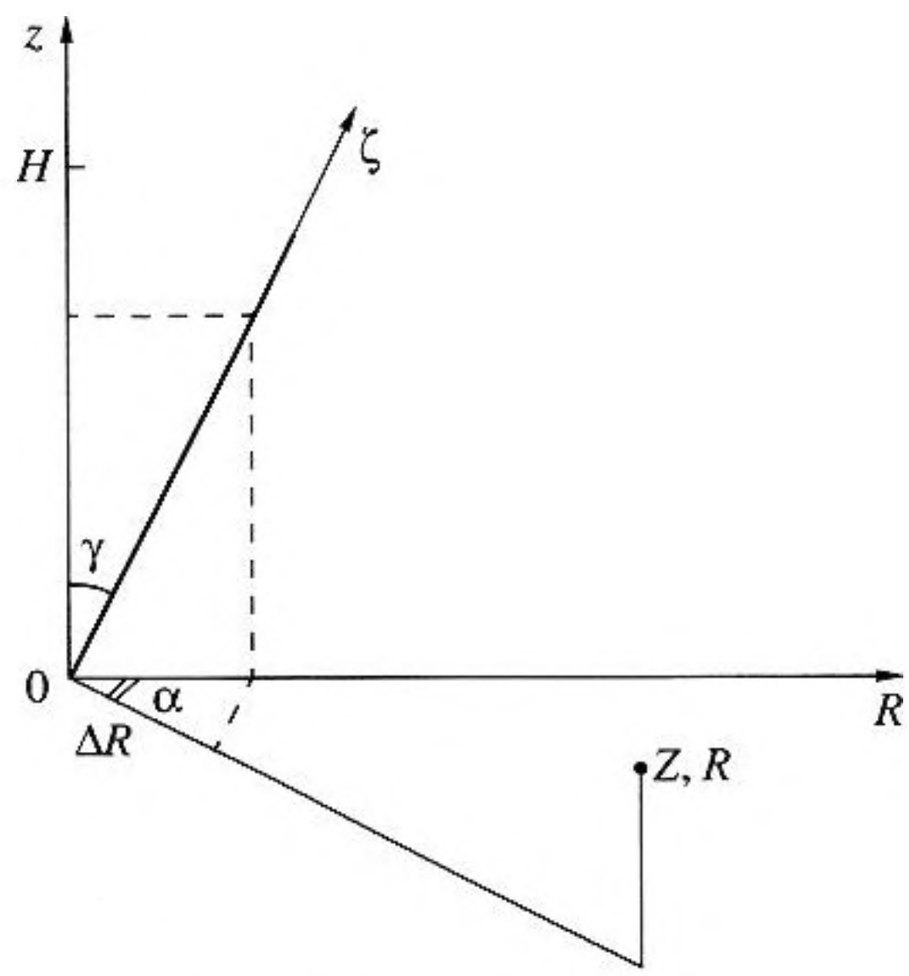

Рис. 1. Геометрия задачи.

нию по вертикали поля этой моды – антенна "настраивается" на ее излучение. В силу свойства ортогональности собственных функций волновода вся излучаемая антенной звуковая энергия придется на одну моду, на которую настроена антенна.

Действительно, звуковой потенциал поля в точке (Z, R) волновода, создаваемого непрерывной линейной вертикальной антенной, излучающей монохроматический сигнал, будет определяться выражением

$$U_a(Z, R, t) = \int_0^H \cos(b_q z) U(z, Z, R, t) dz. \quad (1)$$

Здесь Z – горизонт точки приема, R – расстояние по горизонтали от места расположения антенны до точки приема, t – текущее время, z – горизонт расположения z-го элемента антенны. Предполагается, что начало координат расположено на дне и ось z направлена вверх. $b_q = (q - 0.5)\pi/H$ – вертикальная компонента волнового вектора q-ой моды, а $\cos(b_q z)$ – собственная функция этой моды, на излучение которой настроена антенна. $U(z, Z, R, t)$ – звуковой потенциал поля в точке (Z, R), создаваемый элементом антенны, расположенным на горизонте z. Рассматривая этот элемент как точечный и ненаправленный, звуковой потенциал поля на больших расстояниях от антенны можно определить выражением [10]

$$U(z, Z, R, t) = \\ = \frac{A}{\sqrt{R}} \sum_{l=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{\xi_l}} \cos(b_l z) \cos(b_l Z) \exp(j\xi_l R - j\omega t), \quad (2)$$

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

Здесь V_0 – производительность источника; m – число мод, распространяющихся в волноводе без затухания; $\xi_l = \sqrt{k^2 - b_l^2}$ – горизонтальная компонента волнового вектора l-ой моды; $k = \omega/C$ – волновое число, ω – круговая частота излучения, C – скорость звука в водной толще.

Подставляя (2) в (1) и производя необходимые преобразования с учетом условия ортогональности собственных функций волновода

$$\int_0^H \cos(b_q z) \cos(b_l z) dz = H/2 \quad (3)$$

$$\text{при } q = l \text{ и } 0 \text{ при } q \neq l,$$

находим, что

$$U_a(Z, R, t) = \frac{A}{\sqrt{R}} \frac{H}{2} \frac{\cos(b_q Z)}{\sqrt{\xi_q}} \exp(j\xi_q R - j\omega t). \quad (4)$$

Из этого выражения следует, что вертикальная линейная антенна, перекрывающая весь волновод по его толщине и настроенная на излучение q-ой моды, излучает только одну эту моду и в силу цилиндрической симметрии задачи диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости представляет собой окружность.

Пусть антенна как целое, не искривляясь, отклоняется от вертикали на угол γ. Геометрия задачи изображена на рис. 1. При этом глубина каждого элемента антенны уменьшается до $z = \varsigma\cos\gamma$, где ς координата, отсчитываемая вдоль апертуры, и интегрирование по z следует вести от нуля до $z_M = H\cos\gamma$. Направление горизонтальной оси R при этом совпадает с направлением, в котором наклонена антенна.

Элемент антенны с координатой ς получает поправку ΔR на расстояние до точки наблюдения. В плоскости наклона антенны $\Delta R = \varsigma\sin\gamma$ и, как видно на рис. 1, расстояние при любом азимуте α будет равно

$$R - \Delta R = R - \varsigma\sin\gamma\cos\alpha = R - z\,\mathrm{tg}\gamma\cos\alpha.$$

При наклоне антенны функция возбуждения q-ой моды принимает вид $\cos(b_q z/\cos\gamma)$. Звуковой потенциал, создаваемый такой антенной, будет определяться выражением

$$U_a(Z, R, \alpha, t) = \frac{A}{\sqrt{R}} \exp(-j\omega t) \sum_{l=1}^{m} \frac{\cos(b_l Z)}{\sqrt{\xi_l}} \times \\ \times \exp(j\xi_l R) \int_0^{z_M} \cos(b_q z) \exp(-\xi_l \mathrm{tg}\gamma\cos\alpha z) dz = \\ = \frac{A}{\sqrt{R}} \exp(-j\omega t) \frac{z_M}{4} \sum_{l=1}^{m} \frac{\cos(b_l Z)}{\sqrt{\xi_l}} \times \quad (5)$$

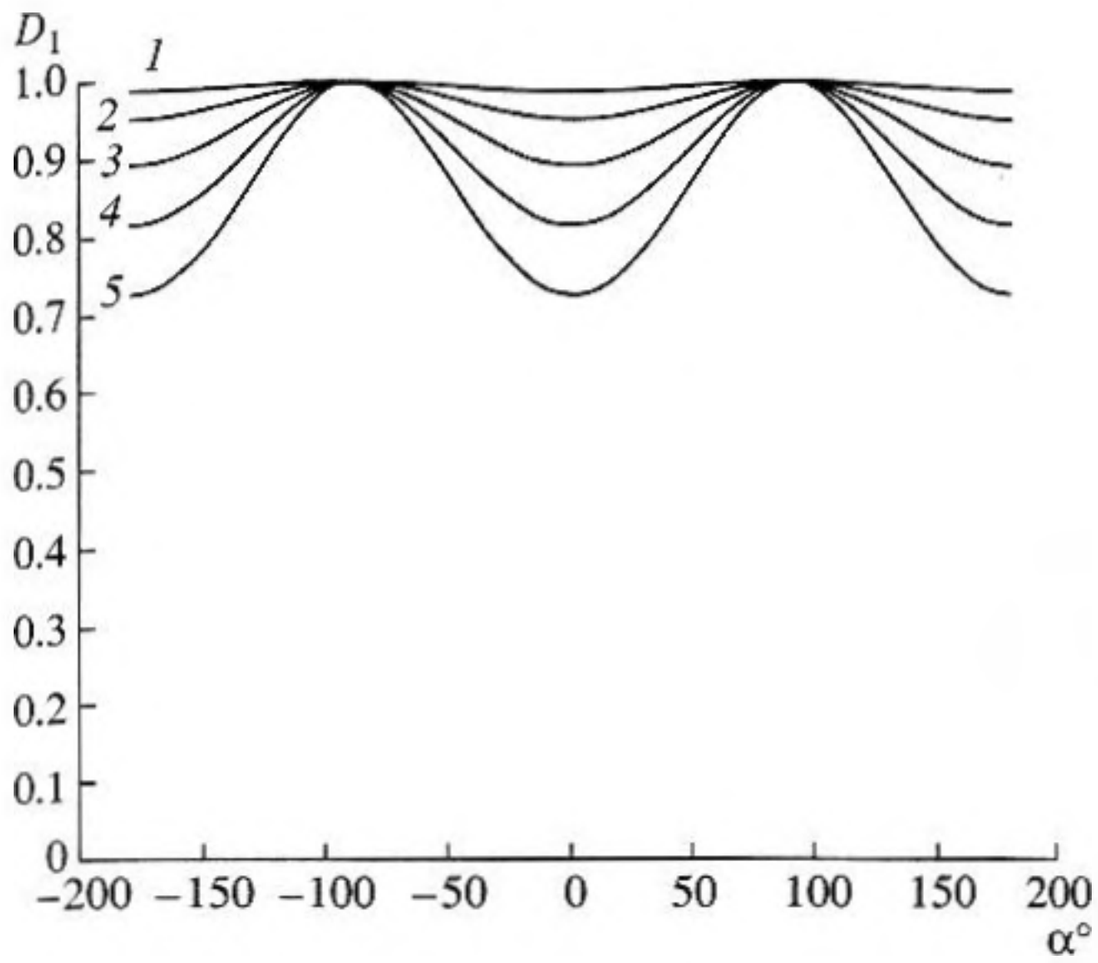

Рис. 2. Диаграмма направленности в мелком волноводе при $H = 2.5\lambda$, $q = 1$: $\gamma = 2°$ (*1*), $\gamma = 4°$ (*2*), $\gamma = 6°$ (*3*), $\gamma = 8°$ (*4*), $\gamma = 10°$ (*5*).

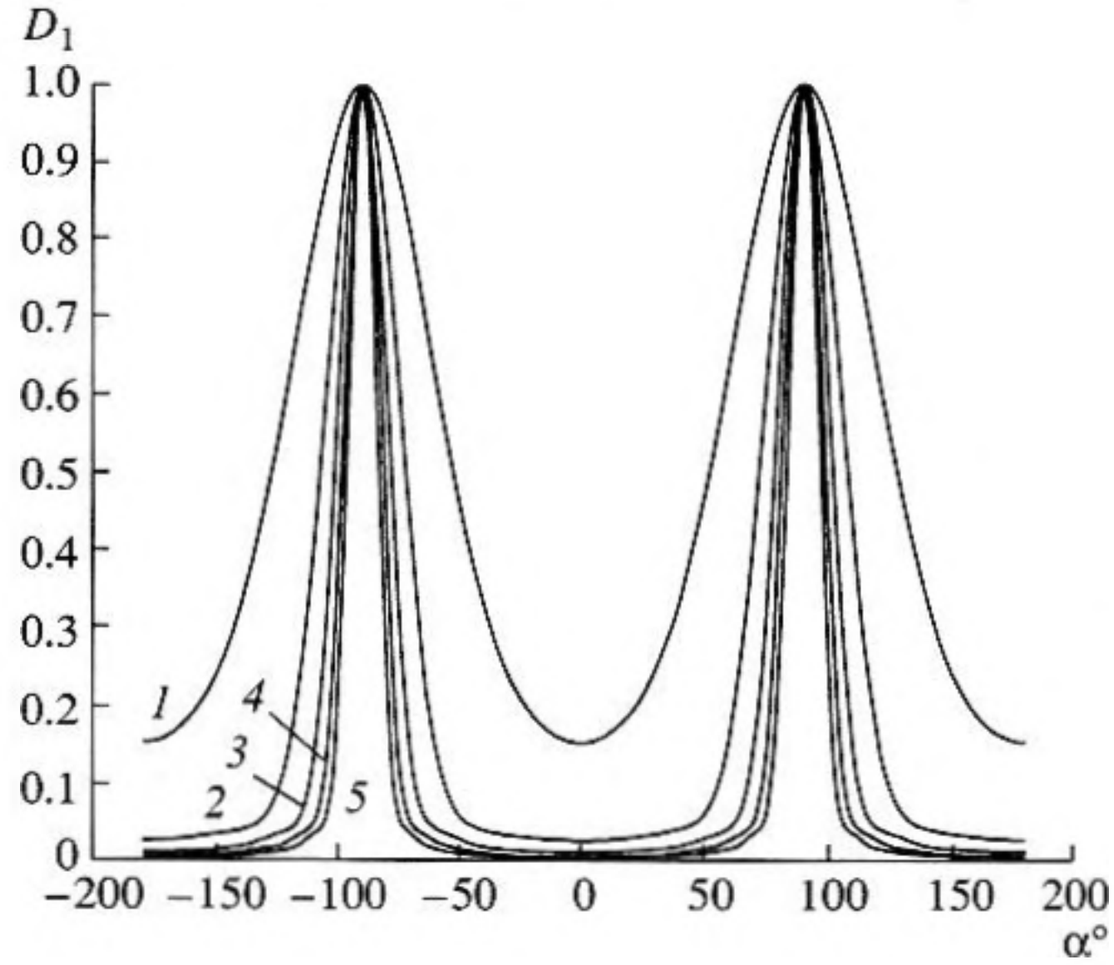

Рис. 3. Диаграмма направленности в глубоком волноводе при $H = 30\lambda$, $q = 1$: $\gamma = 2°$ (*1*), $\gamma = 4°$ (*2*), $\gamma = 6°$ (*3*), $\gamma = 8°$ (*4*), $\gamma = 10°$ (*5*).

$$\times [a(l, \alpha) + jb(l, \alpha)]\exp(j\xi_l R).$$

$$a(l, \alpha) = \sum_{i=1}^{4} \frac{\sin(c_i z_M)}{c_i z_M};$$

$$b(l, \alpha) = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{1}{c_i z_M} - \frac{\cos(c_i z_M)}{c_i z_M} \right),$$

$$\begin{aligned} c_1 z_M &= kH(G_1 - w), \quad c_2 z_M = kH(G_2 - w), \\ c_3 z_M &= kH(-G_2 - w), \quad c_4 z_M = kH(-G_1 - w), \end{aligned} \tag{6}$$

$$G_{1,2} = b_q/k \pm b_l/k\cos\gamma,$$

$$w = \sqrt{1 - (b_l/k)^2}\sin\gamma\cos\alpha.$$

Отклонение антенны от вертикального положения приводит к тому, что кроме излучения q-ой моды, на которую настроена антенна, будут излучаться моды других номеров. И если вся мощность, излучаемая настроенной вертикальной антенной, приходится на одну q-ую моду, то мощность, излучаемая той же, но отклоненной от вертикали антенной, распределяется между q-ой модой и группой соседних мод.

Кроме того, отклонение антенны от вертикали приводит также к появлению горизонтальной составляющей ее апертуры, что вызывает появление направленности антенны в горизонтальной плоскости, т.е. ее диаграмма в горизонтальной плоскости становится отличной от окружности. При этом эффект направленности будет иметь место для всех излучаемых мод.

Поскольку представляет интерес излучение q-ой моды, то направленность антенны в горизонтальной плоскости будем характеризовать ее диаграммой по интенсивности звукового поля этой q-ой моды

$$D_q(\alpha) = \frac{P_q P_q^*}{\max\{P_q P_q^*\}} = a^2(q, \alpha) + b^2(q, \alpha), \tag{7}$$

где согласно [10, 12] звуковое давление $P = j\rho\omega U$.

В качестве примеров были выполнены расчеты для двух волноводов – мелкого $H = 2.5\lambda$ и глубокого – $H = 30\lambda$, λ – длина звуковой волны в водной толще. Так при частоте излучения 300 Гц ($\lambda = 5$ м) глубина мелкого волновода $H = 12.5$ м, а глубокого – $H = 150$ м. В мелком волноводе может распространяться $m = 5$ мод, а в глубоком – $m = 60$ мод. На рис. 2 и 3 представлены диаграммы направленности по первой моде $D_1(\alpha)$ расположенных в этих волноводах линейных антенн, настроенных на излучение первой моды и отклоняющихся на различные углы γ (2°, 4°, 6°, 8° и 10°). Из рисунков видно, что даже слабо наклоненная антенна приобретает направленность в горизонтальной плоскости, особенно ярко выраженную в глубоком волноводе. Максимумы излучения расположены в направлениях, перпендикулярных направлению наклона антенны. Наоборот, в сторону наклона и в противоположную ей сторону антенна в глубоком волноводе уже при наклоне $\gamma = 4°$ практически не излучает первую моду. Ширина лепестка диаграммы в поперечных направлениях при этом близка к 35° (рис. 3). Для 150-ме-

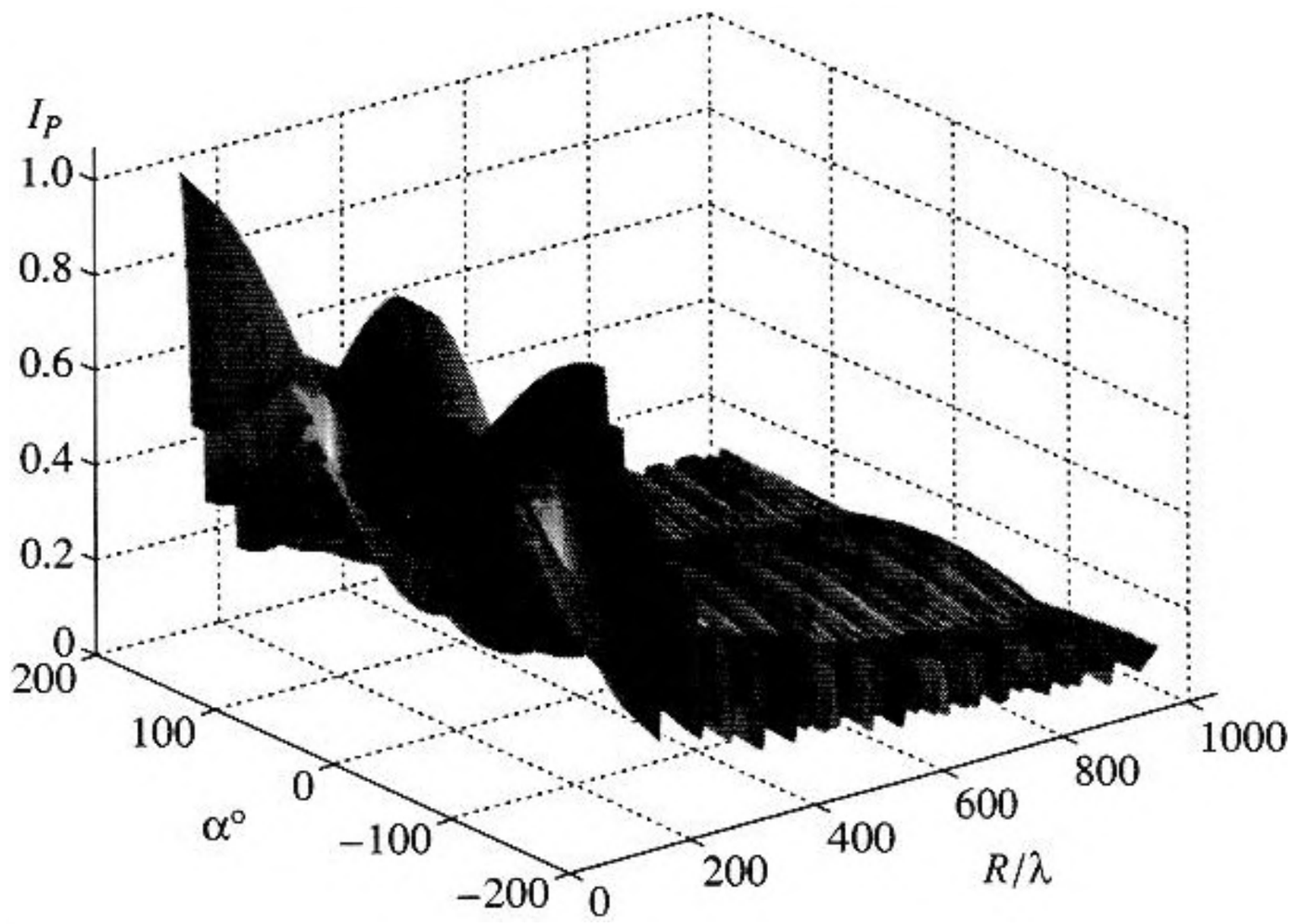

Рис. 4. Интенсивность поля в мелком волноводе. $H = 2.5\lambda$, $m = 5$, $\gamma = 5°$, $\alpha = 0°$, $q = 1$.

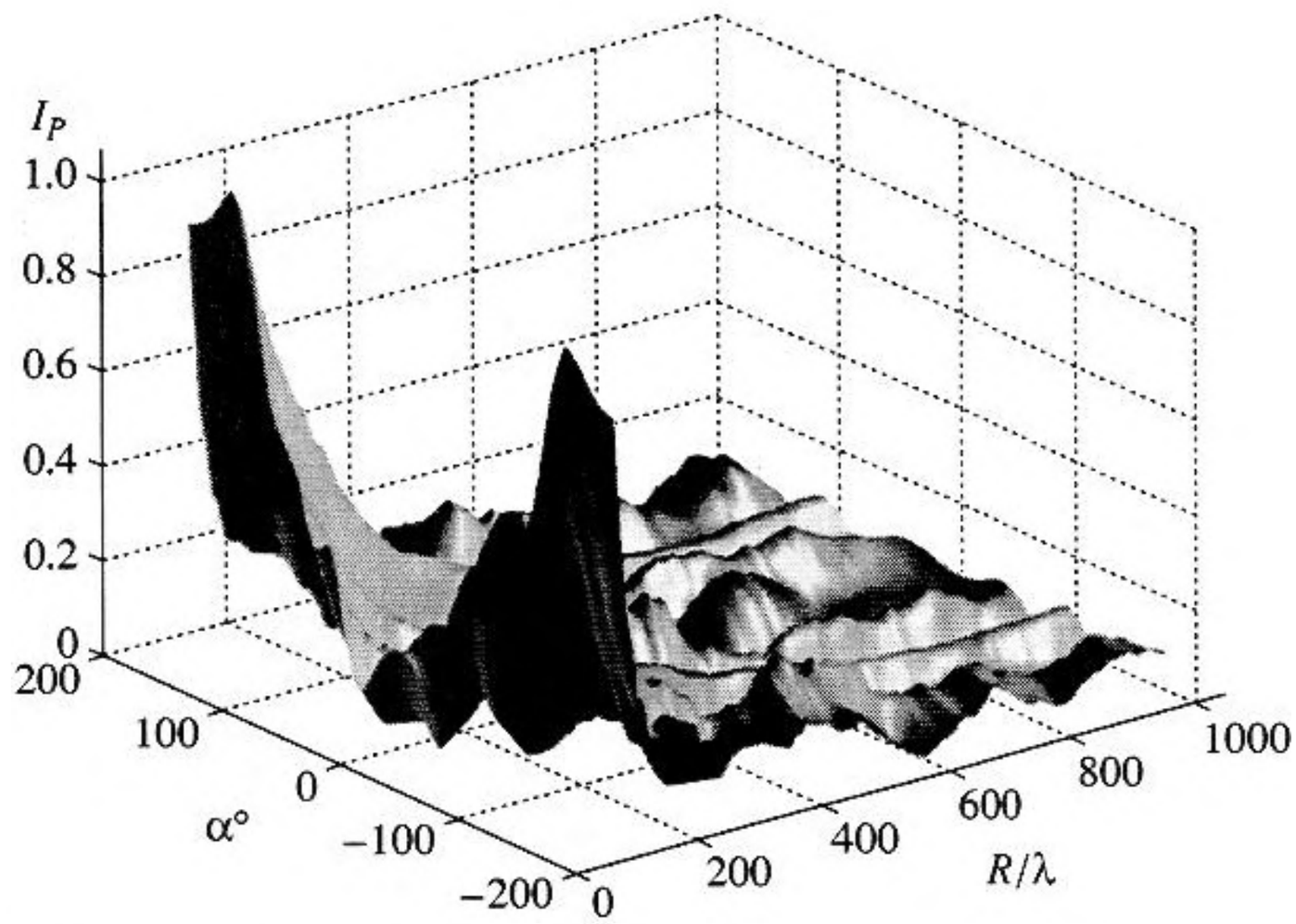

Рис. 5. Интенсивность поля в глубоком волноводе. $H = 30\lambda$, $m = 60$, $\gamma = 5°$, $\alpha = 0°$, $q = 1$.

трового волновода горизонтальная проекция апертуры антенны равна $H\sin(4°) = 10.46$ м. Прямоугольная вертикальная антенна такой ширины на частоте 300 Гц имела бы раствор лепестка по горизонтали порядка 27°.

По мере увеличения наклона антенны уменьшается эффективность излучения первой моды. Вместе с первой модой антенна начинает излучать моды более высоких порядков, что приводит к возникновению интерференционной структуры поля, зависящей от азимута и расстояния. В качестве примера на рис. 4 и 5 приведены трехмерные графики зависимости нормированной на максимум интенсивности поля давления от азимута α и расстояния R соответственно в мелком и глубоком волноводах ($\gamma = 5°$ и $Z = 0.5H$)

$$I_P(Z, R, \alpha) = \frac{P_a(Z, R, \alpha)P_a^*(Z, R, \alpha)}{\max\{P_a(Z, R, \alpha)P_a^*(Z, R, \alpha)\}}, \quad (8)$$

$$P_a P_a^* = (\omega\rho)^2 \frac{AA^*}{R}\left(\frac{z_M}{4}\right)^2 \left\{\left(\sum_{l=1}^{m} \frac{\cos(b_l Z)}{\sqrt{\xi_l}}[a(l,\alpha)\cos(\xi_l R) - b(l,\alpha)\sin(\xi_l R)]\right)^2 + \right.$$
$$\left. + \left(\sum_{l=1}^{m} \frac{\cos(b_l Z)}{\sqrt{\xi_l}}[a(l,\alpha)\sin(\xi_l R) + b(l,\alpha)\cos(\xi_l R)]\right)^2\right\}. \quad (9)$$

Рисунки показывают, что полное поле имеет сложную конфигурацию, особенно в глубоком волноводе. Средний закон спадания пропорционален $1/R$, как в любом волноводе без затухания. Картина симметрична относительно плоскости наклона антенны ($\alpha = 0°$). Однако максимумы интенсивности поля, наблюдаемые при $\alpha = \pm 90°$, не на всех расстояниях R оказываются наибольшими. Благоприятные условия интерференции по модам высоких номеров на некоторых расстояниях дают относительно высокие уровни поля при значениях азимута, на которых уровень поля по первой моде был низким (рис. 3).

Представляет интерес рассмотрение вопроса о распределении излучаемой наклонной антенной звуковой энергии между модами различных номеров. Мощность, излучаемая компенсированной вертикальной антенной в волноводе, исследовалась, в частности, в работе [11]. Будем рассуждать аналогично. Излучаемая наклонной антенной в волноводе звуковая энергия переносится через боковую поверхность цилиндра большого радиуса R, вблизи оси которого расположена антенна (дно и поверхность волновода абсолютно отражающие). Излучаемая акустическая мощность W_a, определяется интегрированием горизонтальной компоненты плотности потока мощности J_a по этой цилиндрической поверхности

$$W_a = \int_0^H \int_0^{2\pi} J_a(Z, R, \alpha) R d\alpha dZ. \quad (10)$$

Величина J_a согласно [10, 12] определяется как

$$J_a(Z, R, \alpha) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(P_a V_{aR}^*) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(j\rho\omega U_a \frac{\partial U_a}{\partial R}\right). \quad (11)$$

P_a и V_{aR} – давление и горизонтальная компонента колебательной скорости звукового поля в точке (Z, R, α) волновода. Используя полученное выше выражение звукового потенциала U_a (5) и производя необходимые преобразования, получаем величину для мощности излучения наклонной антенны в волноводе, как сумму мощностей, излучаемых по отдельным модам

$$W_a = \frac{1}{2}\rho\omega HAA^*\left(\frac{z_M}{4}\right)^2 \times$$
$$\times \sum_{l=1}^{m} \int_0^{2\pi} [a^2(l,\alpha) + b^2(l,\alpha)] d\alpha = \sum_{l=1}^{m} W_a^l. \quad (12)$$

Так, в мелком волноводе ($H = 2.5\lambda$, $m = 5$, $\gamma = 5°$, $q = 1$) звуковая энергия переносится в основном первой модой. Вторая мода переносит только около 7% энергии первой моды. Остальные три моды не возбуждаются. В глубоком волноводе ($H = 30\lambda$, $m = 60$, $\gamma = 5°$, $q = 1$) положение иное. Основную роль играют 5-ая и 6-ая моды, остальные практически не возбуждаются (на рис. 6 представлено только 20 первых мод).

Таким образом, ненаправленная в горизонтальной плоскости вертикальная антенна приобретает направленность при ее отклонении от вертикального положения. Искажения направленности невелики, если наклон не превышает нескольких градусов, а глубина волновода – нескольких длин звуковых волн, но становятся существенными в волноводах глубиной несколько десятков длин волн. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости приобретает глубокие минимумы в направлении наклона и

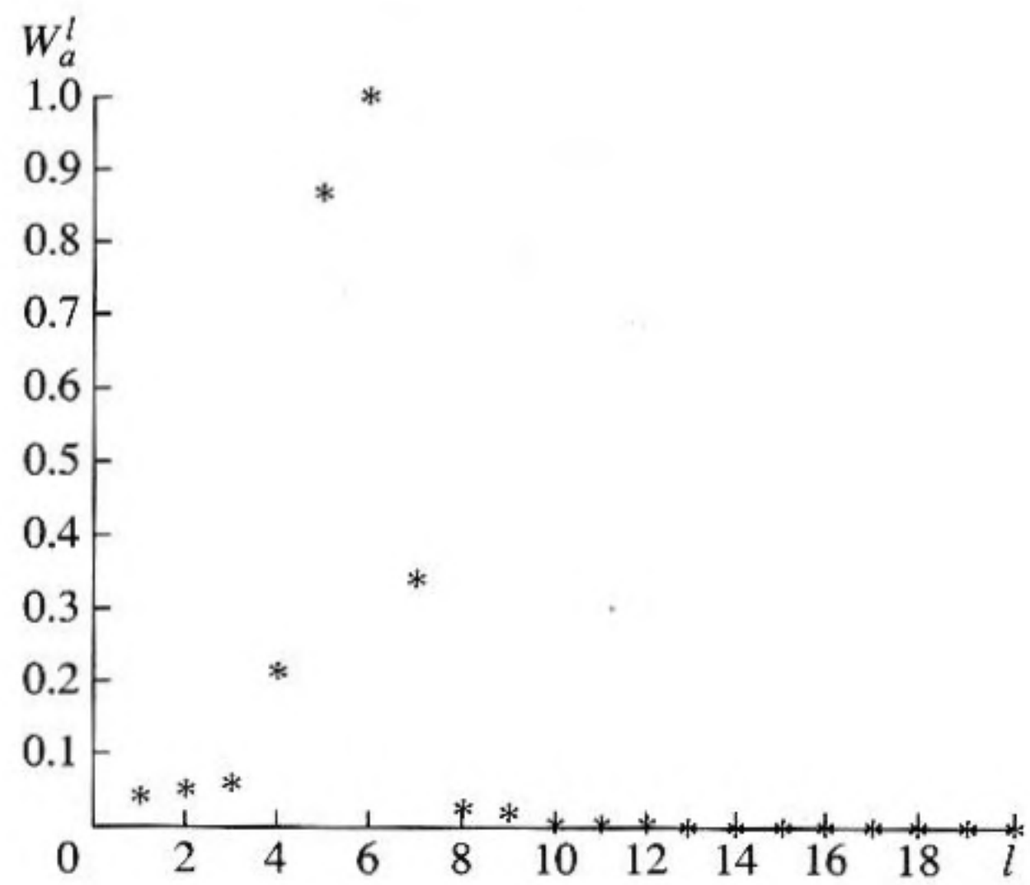

Рис. 6. Распределение по модам мощности, излучаемой наклонной антенной в глубоком волноводе. $H = 30\lambda$, $m = 60$, $\gamma = 5°$, $q = 1$.

максимумы в поперечных направлениях. Существенно изменяется состав излучаемых мод. Помимо моды, на которую настроена антенна, излучаются моды других номеров (причем значительно интенсивнее), что приводит к возникновению сложной интерференционной структуры поля. Искажения формы приемной антенны, обычно определяемые при помощи сторонних средств, учитываются при приеме сигналов, приходящих с заданных горизонтальных направлений. Эти направления могут быть обработаны в последовательном или параллельном режимах. Однако наклон может оказаться существенным препятствием в случаях, когда антенна является излучающей и требуется посылать сигнал по всем горизонтальным направлениям одновременно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baggeroer A.B., Cuperman W.A.* Matched field processing in ocean acoustics. Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration. Ed. by M.F. Moura and J.M.G. Lourtie // NATO ASJ Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences. 1993. V. 388. P. 79–114.
2. *Yang T.C., Yoo K., Yates T.* Matched-beam processing: Range tracking with vertical array in mismatched environments // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 104. № 4. P. 2174–2188.
3. *Hodgkiss W.S., Ensberg D.E., Murray J.J., D'Spain G.L., Booth N.O., Schey P.W.* Direct measurement and matched-field inversion approach to array shape stimation // JEEE J. Ocean Eng. 1996. V. 21. P. 393–401.
4. *Dosso S.E., Sotirin B.J.* Optimal array element localisation // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 106. № 6. P. 3445–3459.
5. *Snellen M., Simons D.G.* An evaluation of the accuracy of shallow water matched field inversion results // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. № 2. P. 514–527.
6. *Буров В.А., Сергеев О.Н., Сергиевская Н.П.* Акустическая томография океана по данным с вертикальной модовой антенны, произвольно искривленной подводными течениями // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 2. С. 350–353.
7. *Зверев В.А., Павленко А.А.* Формирование направленности гибкой акустической антенны // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 3. С. 352–358.
8. *Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., Akal T., Ferla C., Jackson D.R.* Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal miror // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 103. № 1. P. 25–40.
9. *Hodgkiss W.S., Song H.C., Kuperman W.A., Akal T., Ferla C., Jackson D.R.* A longrange and variable focus phase-conjugation experiment in shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 3. P. 1597–1604.
10. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.
11. *Голубева В.Н., Елисеевнин В.А.* Мощность излучения вертикальной компенсированной линейной антенны в водном слое // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 1. С. 117–120.
12. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

The Directivity of a Radiating Line Array Slightly Deflected from Vertical in a Waveguide

V. A. Eliseevnin and Yu. I. Tuzhilkin

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—The azimuth directivity of a line array in a waveguide is studied for the case of its deflection from the vertical under the effect of underwater currents. The modal composition and the interference pattern of the field radiated by such an array is considered.