

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.874

ВЛИЯНИЕ ПОДВОДНОГО ТЕЧЕНИЯ НА НАПРАВЛЕННОСТЬ ЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

П. Н. Кравчун, О. С. Тонаканов

(кафедра акустики)

Предлагается приближенный способ расчета формы и диаграммы направленности (ДН) линейной антенны на течении, а также дисперсии ДН, обусловленной статистическим разбросом скорости течения. Обсуждается вопрос об оптимальном выборе параметров антенны, позволяющем повысить ее устойчивость к воздействию течений.

Одним из факторов, снижающих стабильность диаграмм направленности (ДН) линейных гидроакустических антенн, являются подводные течения, существующие во всех слоях океана и имеющие в ряде случаев высокие скорости (до 2—2,5 м/с) [1—3]. Воздействуя на антенну силами гидродинамического сопротивления и изменяя ее форму, течение способно заметно исказить ДН и вызвать ее асимметрию. До настоящего времени этому фактору уделялось недостаточное внимание.

В данной работе влияние течения на форму и ДН линейной антенны рассматривается для случая придонной постановки антенны (этот случай актуален в связи с недавним открытием придонных штормов [3, 4]), однако результаты могут быть легко обобщены и на иные варианты. Предполагается, что вектор скорости течения параллелен горизонтальной поверхности дна, а в отсутствие течения антенна ориентирована по вертикали.

Исходная система уравнений, определяющих форму и натяжение кабель-троса (КТ) антенны на течении, имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dy} [T(y) \cos \alpha(y)] + \frac{\rho D_c v^2}{2 \cos \alpha(y)} [c_\tau \cos^3 \alpha(y) + c_n \sin^3 \alpha(y)] = 0, \\ \frac{d}{dy} [T(y) \sin \alpha(y)] - \frac{\rho c g^1}{\cos \alpha(y)} + \frac{\rho D_c v^2}{2 \cos \alpha(y)} [c_\tau \cos^2 \alpha(y) \sin \alpha(y) - \\ - c_n \sin^2 \alpha(y) \cos \alpha(y)] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $T(y)$ — натяжение КТ, $\alpha(y)$ — угол наклона КТ к горизонтали, y — горизонтальная координата (рис. 1, а), ρ — плотность воды, D_c — диаметр КТ, ρ_c — погонная плотность КТ в воде (с учетом усредненной по длине антенны массы приемо-излучающих элементов), g — ускорение свободного падения, v — скорость течения, c_n и c_τ — коэффициенты гидродинамического сопротивления КТ при нормальном и тангенциальном турбулентном обтекании.

Если антенна закреплена на дне и растягивается в вертикальном направлении поплавок-буем, то граничные условия на концах КТ записываются в виде

$$T(y_1) \cos \alpha(y_1) = F_h, \quad T(y_1) \sin \alpha(y_1) = F_A - mg, \quad z(0) = 0, \quad (2)$$

где y_1 — абсцисса верхнего конца КТ (поплавок), F_h и F_A — гидродинамическая сила и сила Архимеда, действующие на поплавок ($F_h = S c_b \rho v^2 / 2$, где S — площадь мидель-сечения, c_b — коэффициент гидродинамического сопротивления поплавка), m — масса поплавка, $z(y)$ — функция, описывающая форму антенны (рис. 1, а).

Система уравнений (1) не позволяет получить решение в замкнутой форме. Однако характерные значения параметров линейных многоэлементных гидроакустических антенн, их поплавков и коэффициентов гидродинамического сопротивления ($D_c \sim 0,5 \cdot 10^{-2}$ м, $\rho_c \sim 0,2-1$ кг/м, $L \sim 100$ м, $D \sim 1$ м, где L — длина антенны, D — диаметр поплавка, $c_n \sim 1-2$, $c_\tau \approx 0,02$, $c_b \approx 0,5$ [5]), а также наблюдаемые в придонном слое профили скорости течений [3] приводят к выводу о том, что влияние тангенциальной составляющей гидродинамической силы, действующей на КТ, пренебрежимо мало ($c_\tau \ll c_n$, т. е. членами, содержащими c_τ , в обоих уравнениях системы (1) можно пренебречь), погонная сила тяжести КТ значительно превышает вертикальную составляющую гидродинамической силы, действующей на единицу длины

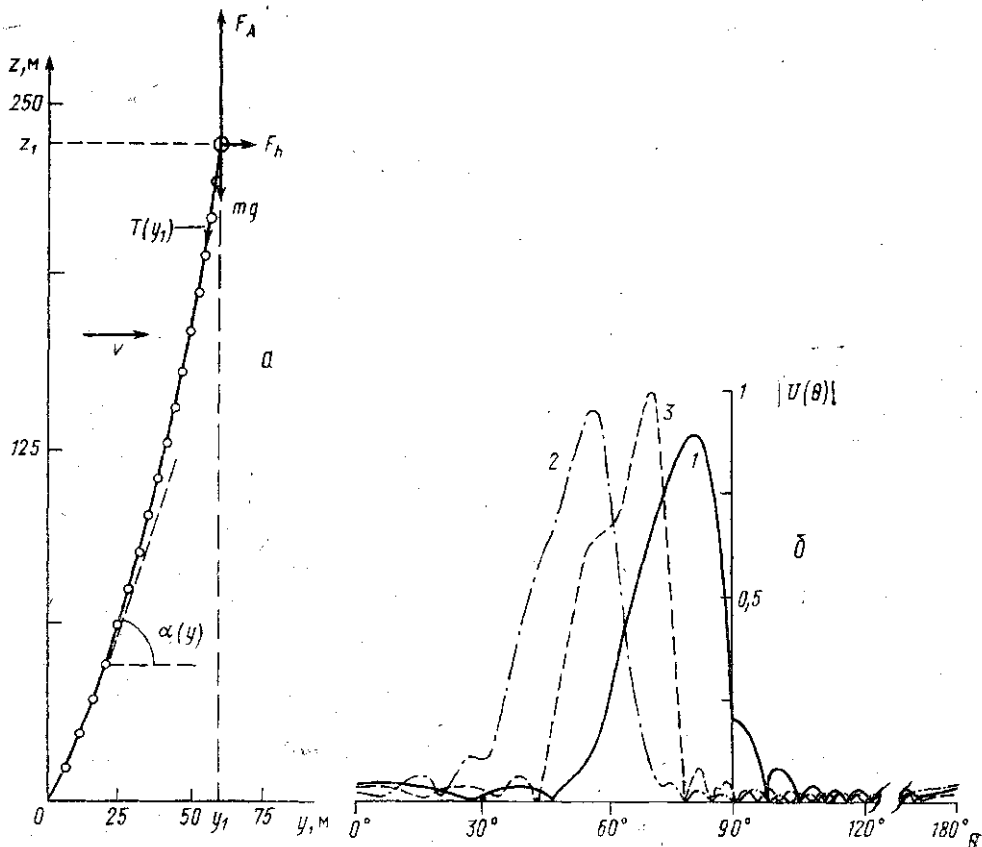


Рис. 1. Форма (а) и диаграммы направленности (б) антенны на течении при $v = 1,25$ м/с, $\varphi = 0$ (1) и $\varphi = \pi$ (2); при $v = 0$ (3)

КТ ($\rho c g \gg \rho D_c v^2 c_n \sin^2 \alpha \cos \alpha$), а основной вклад в горизонтальный снос антенны течением вносит сила F_h , действующая на поплавок (т. е. горизонтальный снос антенны можно учитывать через граничные условия (2), пренебрегая вторым членом в первом из уравнений исходной системы). Указанные приближения позволяют значительно упростить систему (1):

$$\frac{d}{dy} [T(y) \cos \alpha(y)] = 0,$$

$$\frac{d}{dy} [T(y) \sin \alpha(y)] - \frac{\rho c g}{\cos \alpha(y)} = 0.$$

Граничные условия (2) остаются неизменными. Упрощенная система позволяет получить приближенное решение исходной задачи в замкнутой форме. Это решение может быть записано в виде соотношений, определяющих координаты приемно-излучающих элементов антенны:

$$y(n) = \frac{F_h}{\rho c g} \left[\operatorname{arsh} \left(\frac{\rho c g t_n + F_A - mg - L \rho c g}{F_h} \right) - \operatorname{arsh} \left(\frac{F_A - mg - L \rho c g}{F_h} \right) \right], \quad (3)$$

$$z(n) = \frac{F_h}{\rho c g} \left\{ \operatorname{ch} \left[\frac{\rho c g}{F_h} y(n) + \operatorname{arsh} \left(\frac{F_A - mg - L \rho c g}{F_h} \right) \right] - \operatorname{ch} \left[\operatorname{arsh} \left(\frac{F_A - mg - L \rho c g}{F_h} \right) \right] \right\},$$

где n — номер элемента, l_n — расстояние вдоль антенны от точки ее закрепления на дне до n -го элемента.

Зная координаты элементов, легко вычислить ДН:

$$U(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N C_n \exp \left\{ i\gamma_n + i \frac{\omega}{c} \left[y(n) \sin \theta \cos \varphi + z(n) \cos \theta \right] \right\}, \quad (4)$$

где N — число элементов в антенне, C_n и γ_n — модуль и фаза комплексной чувствительности n -го приемного или излучающего элемента, i — мнимая единица, ω — циклическая частота, c — скорость звука в воде, θ и φ — углы сферической системы координат ($\theta=0$ соответствует вертикальному направлению, $\varphi=0$ — направлению скорости течения).

На основе соотношений (3)—(4) были рассчитаны формы и ДН некоторых вариантов антенн для различных скоростей подводного течения. На рис. 1 в качестве примера приведены форма и ДН эквидистантной антенны длиной 250 м, состоящей из 17 ненаправленных элементов, для скорости течения 1,25 м/с; $\rho_c=0,3$ кг/м и $D=0,6$ м (вес поплавка пренебрежимо мал в сравнении с силой Архимеда). Указанные параметры соответствуют введенным ранее ограничениям. Амплитудно-фазовое распределение $C_n \exp\{i\gamma_n\}$ данного варианта антенны было синтезировано по заданной ДН вида $1/\cos \theta$ при $48^\circ < \theta < 73^\circ$ и равной нулю при других углах θ [6]. Расчеты показывают, что наибольшие искажения ДН наблюдаются в плоскости расположения антенны, минимальные — в плоскости, перпендикулярной вектору скорости течения. При малых скоростях течения форма антенны мало отличается от прямой, слегка отклоненной от вертикального направления, а ДН лишь несколько сдвигается по углу θ без заметного искажения своей формы. По мере роста скорости течения отклонение антенны от вертикали увеличивается, форма ее все более сильно искажается (растет прогиб КТ), а ДН не только сдвигается по углу, но и деформируется, теряя осевую симметрию. При больших скоростях течения ДН может исказиться настолько, что антенна окажется неспособной обеспечить требуемую пространственную избирательность. Для приведенного выше примера антенны максимум ДН выходит за пределы заданной области углов при $v > 1,15$ м/с.

Подводные течения во многих случаях характеризуются значительными флуктуациями скорости, вследствие чего представляет интерес вычисление дисперсии ДН, обусловленной статистическим разбросом скорости течения. Выражение для дисперсии модуля ДН может быть получено из соотношений (3)—(4):

$$\begin{aligned} \sigma_U^2 = & \sigma_v^2 \left[\frac{\omega S c_b v}{c g |U(\theta, \varphi)|} \right]^2 \sum_{n=1}^N C_n^2 [\cos \alpha_n \cdot \text{Im } U(\theta, \varphi) - \sin \alpha_n \cdot \text{Re } U(\theta, \varphi)]^2 \times \\ & \times \left\{ \cos^2 \theta \cdot \left[\text{ch} \left(\text{arsh} \frac{A_n}{F_h} \right) - \text{ch} \left(\text{arsh} \frac{B}{F_h} \right) - \frac{A_n^2}{F_h \sqrt{A_n^2 + F_h^2}} + \frac{B^2}{F_h \sqrt{B^2 + F_h^2}} \right]^2 + \right. \\ & \left. + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \left[\text{arsh} \frac{A_n}{F_h} - \text{arsh} \frac{B}{F_h} - \frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + F_h^2}} + \frac{B}{\sqrt{B^2 + F_h^2}} \right]^2 \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

где σ_v^2 — дисперсия модуля скорости течения (считается, что направление течения постоянно), $\alpha_n = (\omega/c) [y(n) \sin \theta \cos \varphi + z(n) \cos \theta] + \gamma_n$, $A_n = \rho_c g l_n + F_A$, $F_A = mg - L \rho_c g$, $B = F_A - mg - L \rho_c g$.

Полученные соотношения позволяют рассмотреть вопрос о выборе параметров антенной системы, повышающем ее устойчивость к воздействию течений. В частности, представляет интерес нахождение оптимальных параметров антенн, позволяющих уменьшить дисперсию ДН (5), вызываемую течением, до значений дисперсии ДН, обусловленной случайными факторами аппаратного происхождения. Наиболее простым и эффективным способом уменьшения дисперсии σ_U^2 антенны на течении является увеличение силы, растягивающей антенну в вертикальном направлении. В рассматриваемой конструкции антенны это легко осуществить путем увеличения диаметра поплавка (при этом выталкивающая сила растет быстрее, чем сила гидродинамического сопротивления: $F_A \sim D^3$, $F_h \sim D^2$). Другим способом может служить уменьшение погонной плотности и, следовательно, общего веса КТ. Заметим, что увеличение натяжения КТ, вызванное ростом размеров поплавка или уменьшением диаметра КТ, может, вообще говоря, привести к струмингу (автоколебаниям КТ как натяну-

той нити в потоке), однако амплитуды струминга, как правило, невелики [7], и в данной работе этот эффект не учитывается.

На рис. 2 в качестве примера приведены кривые, которые позволяют определить оптимальные параметры антенны (диаметр поплавок D и плотность КТ ρ_c) в зависимости от средней скорости $\langle v \rangle$ и дисперсии скорости течения для антенны длиной 250 м с ДН, изображенной на рис. 1, б. Под оптимальными в данном случае понимаются параметры, обеспечивающие снижение дисперсии σ_v^2 в области максимума главного лепестка ДН до значений дисперсии ДН, обусловленной случайными аппаратурными отклонениями амплитуд и фаз приемно-излучающих элементов, т. е. статистическим разбросом их комплексной чувствительности [8]. Как и следует ожидать, оптимальный диаметр поплавок увеличивается по мере роста средней скорости течения при всех значениях ρ_c , причем особенно сильно эта зависимость становится при больших скоростях течения. Некоторое увеличение устойчивости ДН может быть достигнуто также уменьшением ρ_c (при этом уменьшаются деформация антенны, т. е. весовой прогиб, и отклонение антенны от вертикали, что может быть использовано для снижения размера поплавок). Устойчивость антенн увеличивается и при уменьшении их длины, причем эта зависимость для исследованных вариантов антенн ($L=100\div 350$ м) становится особенно существенной при $v > 1,5$ м/с.

Приведенные результаты свидетельствуют, таким образом, о необходимости учета влияния подводных течений на работу линейных гидроакустических антенн, а также позволяют прогнозировать характеристики антенн в условиях течений и осуществлять оптимальный выбор пара-

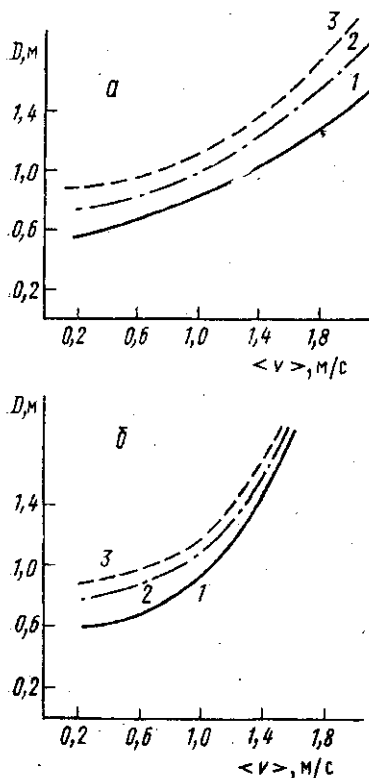


Рис. 2. Графики для определения оптимальных параметров антенны длиной 250 м при $\sigma_v = 0,2\langle v \rangle$ (а), и $0,3\langle v \rangle$ (б): $\rho_c = 0,3$ (1); $0,8$ (2) и $1,2$ кг/м³ (3)

метров антенных систем в зависимости от средней скорости течения, ее дисперсии и требуемой стабильности диаграммы направленности.

Авторы выражают благодарность О. В. Ивановой за помощь при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Постнов Г. А. // Обработка акустической информации в многоканальных системах. Л., 1988. С. 11. [2] Нейман Г. Океанские течения. Л., 1973. [3] Войтов В. И., Соловьев А. В., Ястребов В. С. // Океанология. 1989. 29, № 6. С. 885. [4] Klein H. // Deutsche Hydrograph. Ztschr. 1987. 40, N 3. P. 87. [5] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974. [6] Кравчун П. Н., Пестов К. А., Тонаканов О. С. // Судостроительная промышленность. Сер. Акустика. 1990. № 6. С. 88. [7] Зарецкий А. В., Шеремет Н. А. Деп. ВИНТИ № 8969-88. М., 1988. [8] Кравчун П. Н., Пестов К. А., Тонаканов О. С. // Проблемы метрологии гидрофизических измерений (доклады Всесоюзной конференции). М., 1990. С. 240.

Поступила в редакцию
25.12.90