

3. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. I. М.: Наука, 1976.
4. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
5. Смартышев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.

Акустический институт им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
24.V.1984

УДК 551.46

ВЛИЯНИЕ МАЛОГО ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ АНТЕННЫ НА ЕЕ ОТКЛИК

Комиссарова Н. Н.

Одним из источников ошибок, возникающих в эксперименте по исследованию звукового поля в океане с помощью гибкой протяженной антенны, является искажение формы антенны, возникающее под действием течений и дрейфа судна. Из-за отклонения формы реальной антенны от расчетной модели полной компенсации фазового набега проходящей волны не происходит. Возникающая при этом ошибка имеет систематический характер и может заметно отразиться на отклике антенны.

Рассмотрим линейную протяженную антенну, форма которой слабо отклоняется от вертикальной прямой и задается уравнением

$$x=x(t), \quad z=z(t), \quad (1)$$

где x — горизонтальная, z — вертикальная координаты, а в качестве параметра t принята длина кривой (1), отсчитываемая от середины антенны до ее текущей точки.

Отклик антенны длиной $2l$ описывается функцией

$$\Phi = \int_{-l}^l p(t) A(t) dt.$$

Здесь $p(t)$ — значение поля в текущей точке антенны, $A(t)$ — плотность чувствительности антенны в этой точке, причем $A(t) = \mu(t) \exp[-iks(t)]$, где $\mu(t)$ — амплитудное, $s(t)$ — фазовое распределение. При линейном по длине антенны фазовом распределении $s(t) = -t \sin \gamma$, где γ — угол прихода ожидаемой волны.

При $kl \gg 1$ (k — волновое число) поле p в текущей точке антенны пропорционально $\exp(iks_0)$, где s_0 — набег фазы падающей волны при перемещении ее фронта от центра антенны до текущей точки. Если антенна расположена в слоисто-неоднородной среде, то фронт падающей волны вдали от источника и каустики можно считать плоским, тогда

$$s_0 = -x(t) \cos \gamma_0 - z(t) \sin \gamma_0, \quad (2)$$

где γ_0 — угол между горизонталью (осью x) и направлением прихода падающей волны. В некоторых случаях (вблизи источника, вблизи каустики, в районе скачка градиента скорости звука), как показано в работах [1, 2], нужно учитывать кривизну фронта падающей волны. Тогда

$$s_0 = r_0(t) - R_0, \quad (3)$$

где

$$r_0(t) = \{ [x(t) - R_0 \cos \gamma_0]^2 + [z(t) - R_0 \sin \gamma_0]^2 \}^{1/2},$$

а R_0 — радиус кривизны фронта падающей волны (см. фиг. 1). При равномерном амплитудном распределении нормированный отклик антенны определяется, таким образом, выражением

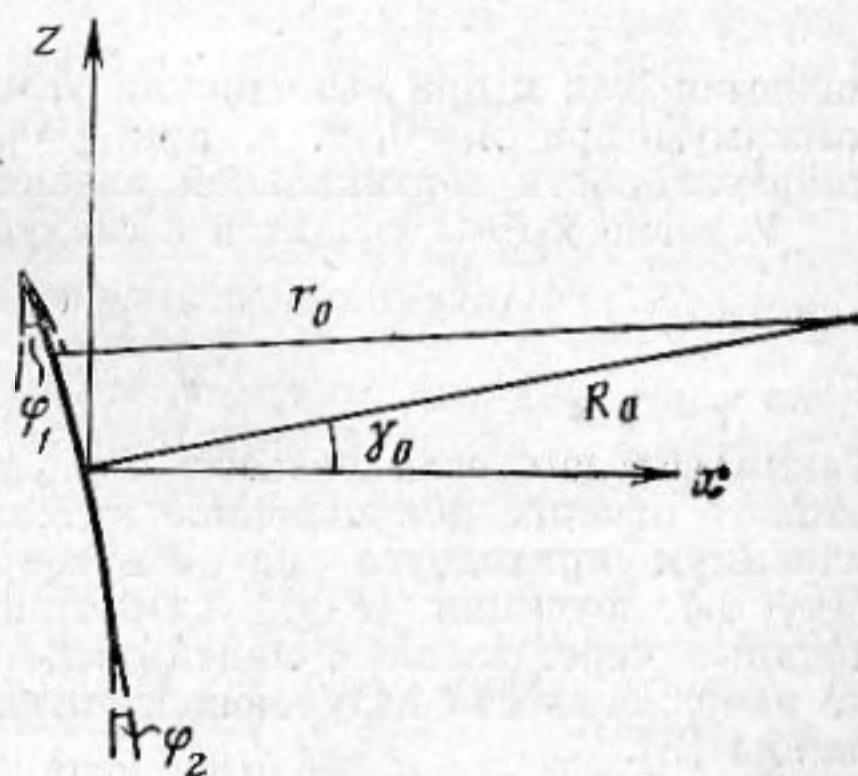
$$F = (1/2l) \int_{-l}^l \exp[ikf(t)] dt, \quad (4)$$

где $f(t) = s_0(t) - s(t)$.

Искажение формы линейной гибкой антенны, находящейся под воздействием течения или дрейфа судна, хорошо описывается уравнением цепной линии. Это уравнение в системе координат (x, z) с началом в середине антенны выглядит следующим образом:

$$x(t) = a \{ \operatorname{arsh}[(L_0 - t)/a] - \operatorname{arsh}(L_0/a) \}, \quad (5)$$

$$z(t) = a \{ [1 + L_0^2/a^2]^{1/2} - [1 + (L_0 - t)^2/a^2]^{1/2} \}, \quad |t| < l, \quad (6)$$



Фиг. 1. Падение волны со сферическим фронтом на искривленную антенну

причем $L_0 = a(\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2)/2$, $a = 2l/(\operatorname{ctg} \varphi_2 - \operatorname{ctg} \varphi_1)$, φ_1, φ_2 — углы между осью z и касательной к антенне в верхнем и нижнем ее концах (см. фиг. 1). Чем больше разность $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, тем сильнее искривлена антенна. Формулы (2) — (6) определяют нормированный отклик антенны, искривленной в виде отрезка цепной линии, на падающую волну.

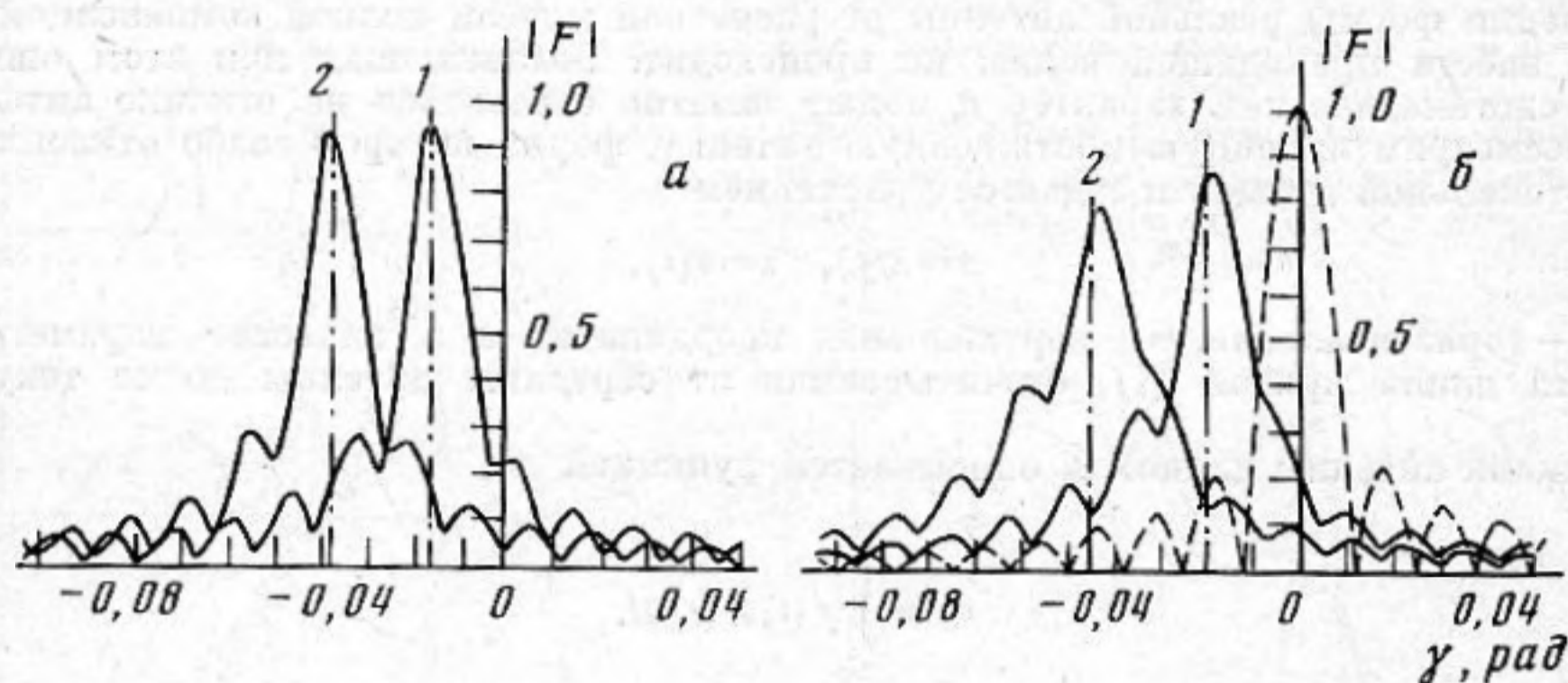
Рассмотрим отклик слабо искривленной антенны на падающую под углом γ_0 плоскую волну. При этом $f(t) = t \sin \gamma - x(t) \cos \gamma_0 - z(t) \sin \gamma_0$. Разложим функцию $f(t)$ в ряд по степеням t :

$$f(t) = \kappa_1 t + \kappa_2 t^2 + \kappa_3 t^3 + \dots \quad (7)$$

Для слабо искривленной в виде цепной линии антенны $(a/L_0 = 2(\operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{ctg} \varphi_2)^{-1} \ll 1)$ коэффициенты $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ равны: $\kappa_1 = k[\sin \gamma - \sin \gamma_0 + a \cos \gamma_0/L_0] \approx k[\sin \gamma - \sin(\gamma_0 - a/L_0)]$, $\kappa_2 = ka \cos \gamma_0/(2L_0^2)$, $\kappa_3 = ka \cos \gamma_0/(3L_0^3)$. При $\kappa_2 l^2 \ll 1$, т. е. при выполнении условия

$$kl \cos \gamma_0 \Delta\varphi/4 \ll 1 \quad (8)$$

можно ограничиться первым членом разложения. При этом нормированный отклик антенны равен характеристике направленности вертикальной антенны той же длины, компенсированной в направлении $\gamma_m = \gamma_0 - a/L_0$: $F(\gamma) = \sin(\kappa_1 l)/(\kappa_1 l)$.



Фиг. 2. Зависимость модуля нормированного отклика искривленной антенны от угла компенсации γ для случая падения плоской волны под углом $\gamma_0 = 0$ при $kl = 250$ и следующих значениях φ_1 и φ_2 : а — $\varphi_1 = 0,03$, $\varphi_2 = 0,01$ (1); $\varphi_1 = 0,05$, $\varphi_2 = 0,03$ (2); б — $\varphi_1 = 0,05$, $\varphi_2 = 0,01$ (1); $\varphi_1 = 0,07$, $\varphi_2 = 0,03$ (2)

При большем искривлении антенны, таком, что условие (8) не выполняется, но при $\kappa_3 l^3 \ll 1$, можно ограничиться первыми двумя членами разложения (7). Нетрудно убедиться, что в этом случае модуль нормированного отклика антенны

$$|F(\gamma)| = \frac{1}{2l} \left(\int_{-l}^l \exp(i\kappa_1 t + i\kappa_2 t^2) dt \int_{-l}^l \exp(-i\kappa_1 t - i\kappa_2 t^2) dt \right)^{1/2}$$

является, как и при выполнении условия (8), четной функцией параметра κ_1 , имеет максимум при $\kappa_1 = 0$, т. е. при $\gamma = \gamma_m = \gamma_0 - a/L_0$, но не сводится к характеристике направленности вертикальной антенны, компенсированной в направлении γ_m .

Условие $\kappa_3 l^3 \ll 1$ сводится к следующему:

$$\frac{1}{6} kl \cos \gamma_0 (\Delta\varphi)^2 / (\varphi_1 + \varphi_2) \ll 1. \quad (9)$$

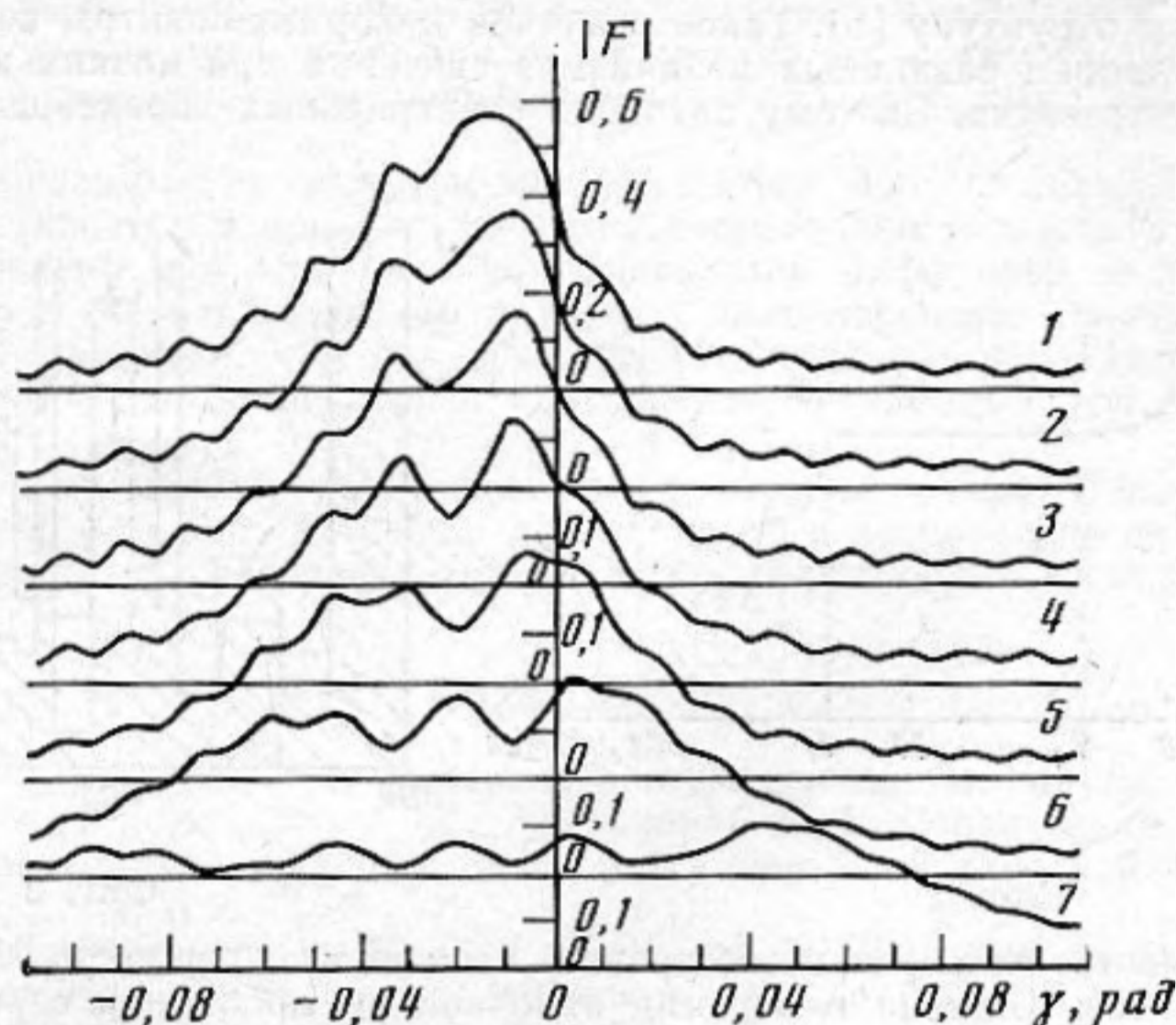
Таким образом, если разность $\Delta\varphi$ удовлетворяет условию (9), то модуль нормированного отклика искривленной антенны обладает следующими свойствами: главный максимум приходится на значение угла компенсации $\gamma_m = \gamma_0 - a/L_0 \approx \gamma_0 - 2\varphi_1\varphi_2/(\varphi_1 + \varphi_2)$, функция $|F(\gamma)|$ симметрична относительно вертикальной прямой, проходящей через главный максимум. Аналогичным образом изменяется характеристика направленности излучающей антенны под влиянием квадратичных фазовых искажений [3].

Если антенна искривлена настолько, что условие (9) не выполняется, то отклик антенны уже не обладает отмеченными выше свойствами. Для его определения необходимо прибегать к численному интегрированию в выражении (4). На фиг. 2 представлены результаты расчетов модуля нормированного отклика антенны на падающую плоскую волну. На фиг. 2, б пунктиром изображен модуль нормированного отклика неискаженной антенны на эту же плоскую волну (характеристика направленности вертикальной антенны). Приближенная оценка интеграла (4) при малых значениях углов φ_1 и φ_2 ($a/L_0 \ll 1$) показывает, что положение главных максимумов определяется величиной $\gamma_0 - \bar{\varphi}$, где $\bar{\varphi}$ — усредненное по длине антенны значение угла ее наклона $\varphi(t) = \operatorname{arctg}((L_0 - t)/a)$:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{2l} \int_{-l}^l \varphi(t) dt = \frac{\varphi_1 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \ln \frac{\varphi_1}{\varphi_2}. \quad (10)$$

Положения главных максимумов, рассчитанные по формуле (10), изображены на фиг. 2 штрихпунктирными прямыми.

Эти расчеты демонстрируют влияние искажения формы антенны на ее отклик. Искривление антенны приводит к тому, что уменьшается отклик антенны в главном максимуме, кривая зависимости $|F|$ от угла компенсации γ становится несимметричной, а сам главный максимум смещается. Положение главного максимума γ_m , как видно из расчетов, неплохо описывается выражением $\gamma_m = \gamma_0 - \bar{\varphi}$, где $\bar{\varphi}$ определяется формулой (10). Расчеты, проведенные для меньших значений kl , показали, что чем меньше частота, тем меньше сказывается искривление антенны на ее отклике, однако положение главного максимума не зависит от величины kl .



Фиг. 3. Зависимость модуля нормированного отклика искривленной антенны от угла компенсации γ для случая падения под углом $\gamma_0 = 0$ сферической волны при $kl = 250$, $\varphi_1 = 0,05$, $\varphi_2 = 0,01$ и $l/R_0 = 1/70, 1/60, 1/50, 1/40, 1/30, 1/20, 1/10$ (1-7)

Еще больше отклик искривленной антенны отличается от характеристики направленности вертикальной антенны, когда падает волна со сферическим фронтом. На фиг. 3. представлены результаты расчета зависимости модуля нормированного отклика антенны (отрезка цепной линии) от угла компенсации γ для разных значений отношения половины длины антенны l к радиусу кривизны R_0 фронта падающей волны. Значение l/R_0 изменяется от $1/10$ до $1/70$. Соответствующие этим значениям функции $|F|$ смещены по вертикали друг относительно друга. Из графиков видно, что при увеличении l/R_0 главный максимум становится менее выраженным, положение его меняется, вместо одного главного максимума могут появиться два, значение $|F|$ в максимуме уменьшается. При $l/R_0 > 0,05$ кривая $|F(\gamma)|$ совсем расплывается.

Расчеты модуля нормированного отклика антенны показали, что для углов падения γ_0 , соответствующих водным лучам в глубоком океане, функция $|F|$ зависит от разности $(\gamma - \gamma_0)$, т. е. изменение угла падения γ_0 приводит к параллельному сдвигу кривой $|F|$ вдоль оси γ .

Отмеченные выше особенности отклика искривленной антенны следует учитывать при интерпретации экспериментальных данных, полученных с помощью этой антенны, в частности при определении углового спектра звукового поля и его энергетических характеристик. Для достижения максимального отклика антенны на падающую волну следует скомпенсировать дополнительный фазовый набег, обусловленный кривизной фронта падающей волны и искажением формы антенны, путем введения соответствующего нелинейного фазового распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кремер И. Я., Поныкин В. А. Пространственно-временная обработка сигналов в зоне Френеля. — Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 1, с. 72-79.
2. Комиссарова Н. Н. Об отклике приемной антенны в неоднородной среде. — Акуст. журн., 1981, т. 27, № 2, с. 254-260.
3. Айзенберг Г. З. Антенны ультракоротких волн. М.: Связьиздат, 1957.

Акустический институт им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
2.VIII.1984