



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСТАНЦИИ ДО ЦЕЛИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ АНТЕННЫ

И. М. Рудько

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Рассмотрен способ определения дальности до цели при пространственно-временной обработке сигналов в режиме пассивной локации целей, находящихся в зоне Френеля антенны, в случае, когда излучаемый целью сигнал содержит узкополосную составляющую.

ВВЕДЕНИЕ

В пассивных гидролокационных системах обнаружение объектов и оценка их координат основаны на приеме и обработке акустических сигналов, излучаемых целью. Работа пассивных гидролокационных систем лимитируется потерями на распространение акустических сигналов и уровнем аддитивных шумов приемника, а также неточностью знаний акустических параметров целей и обусловленным водной средой размыванием сигналов, излучаемых целью, как по времени, так и по частоте.

При обработке сигналов от целей, расположенных в дальней зоне приемной антенны, волновой фронт акустической волны в пределах апертуры антенны является практически плоским (цель находится в зоне Фраунгофера). В этом случае путем пространственно-временной обработки сигналов можно осуществлять разрешение целей по направлению [1].

При пассивной локации полное определение местоположения цели возможно лишь тогда, когда она находится в зоне Френеля антенны (цилиндрический фронт волны). При этом единственным источником прямой информации о дальности до источника излучения является кривизна фронта волны.

В настоящей статье рассматривается способ определения дальности до цели методом максимального правдоподобия при пространственно-временной обработке сигналов в режиме пассивной локации целей, находящихся в зоне Френеля, в случае, когда излучаемый целью сигнал содержит узкополосную составляющую.

1. ПЛОТНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ ИЗОТРОПНОЙ ПОМЕХИ

Способы формирования диаграммы направленности антенны, пространственно-временной обработки сигнала и его обнаружения, которые могут осуществляться как во временной, так и в частотной областях, широко известны [1, 2] и в дальнейшем не рассматриваются.

В приведенном далее алгоритме обработка входного сигнала производится в частотной области, в координатах (время — t , пространство приемников — $j = 1, \dots, M$).

Пусть сигнал от цели C , коррелированный по фронту волны и содержащий узкополосную составляющую с частотой f_0 и интенсивностью A , находящейся на расстоянии r_0 под углом θ (здесь и далее углы отсчитываются от нормали к плоскости антенны в ее центре), принимается на M гидрофонов линейной эквидистантной антенны с расстоянием между гидрофонами d в узкой полосе Δf , где $\Delta f/f_0 \ll 1$, на фоне узкополосной помехи с пространственно-корреляционной матрицей R_0 размерностью M (рис. 1). Считаем, что система обнаруже-

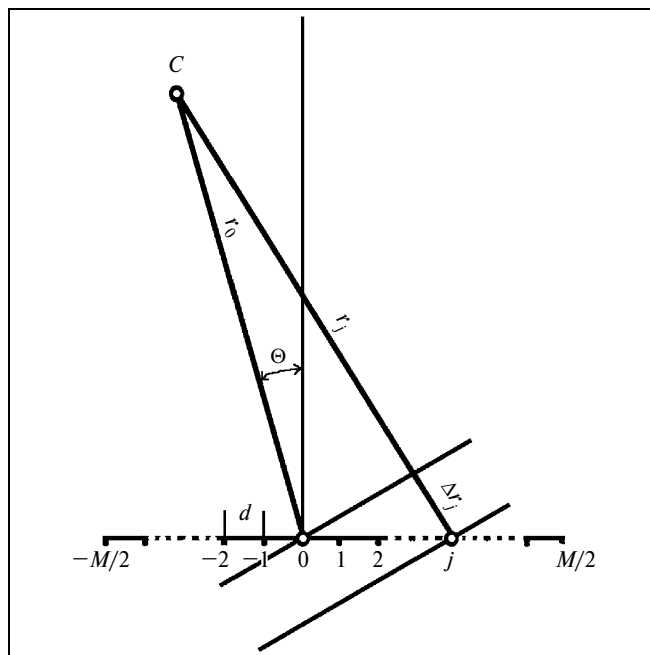


Рис. 1. Взаимное расположение цели и антенны

ния антенны обнаружила узкополосный сигнал от цели S на частоте f_0 в полосе Δf под углом θ . Далее по умолчанию считается, что сигнал обрабатывается на частоте f_0 в полосе Δf . Необходимо оценить дистанцию до цели r_0 .

Априорные сведения о начальной фазе φ сигнала отсутствуют. Узкополосный сигнал $m(t) = A \exp\{-i(2\pi f_0 t + \varphi)\} = U \cos 2\pi f_0 t + iV \sin 2\pi f_0 t$ представляет собой комплексный процесс с независимыми нормально распределенными компонентами U и V , имеющими нулевые математические ожидания и одинаковые дисперсии:

$$N(0, \sigma^2). \quad (1)$$

В момент времени t сигнал на j -м гидрофоне антенны: $z(j, t) = m(t) \exp\{-i2\pi f_0 \Delta r_j / c\} + n(j, t)$, $j = 1, \dots, M$, где c — скорость звука, $\Delta r_j = r_0 - r_j$ — разность расстояний между источником и центром антенны и источником и j -м гидрофоном, $n(j, t)$ — изотропный гауссов белый шум в полосе Δf . Под наблюдением X будем понимать M -мерный вектор-столбец комплексных коэффициентов дискретного Фурье-преобразования по времени t на частоте f_0 сигнала $z(j, t)$: $X = \{x(j_1), x(j_2), \dots, x(j_M)\}^T$, где $\{\cdot\}^T$ — операция транспонирования, $0 \leq t \leq T$, $[0, T]$ — интервал наблюдения, $T = 1/\Delta f$.

Как показано в работе [2], формула для расчета условной плотности вероятности сигнала при наличии изотропной помехи имеет следующий вид:

$$p(X|Y) = \frac{1}{\pi^M \det R_0} \exp\left[-\overline{(X - Y\Phi_\theta)^T} R_0^{-1} (X - Y\Phi_\theta)\right], \quad (2)$$

где $Y = U + iV$ — комплексный коэффициент дискретного Фурье-преобразования сигнала $m(t)$ в полосе Δf на частоте f_0 ,

$$\Phi_\theta = \left\{ \exp\left(-i \frac{2\pi f \Delta r_1}{c}\right), \exp\left(-i \frac{2\pi f \Delta r_2}{c}\right), \dots, \exp\left(-i \frac{2\pi f \Delta r_M}{c}\right) \right\}^T \quad (3)$$

вектор-столбец апертурных функций антенны, а черта сверху означает комплексно сопряженную величину.

Когда волновые размеры антенны соизмеримы с дальностью до цели (цель — в зоне Френеля), при построении апертурных функций Φ_θ необходимо учитывать кривизну фронта волны. Расстояние от цели до j -го приемника, $j = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M/2\}$, [3]

$$r_j = \sqrt{r_0^2 + j^2 d^2} - 2jdr_0 \sin \theta,$$

$$\Delta r_j = r_0 - r_j \approx jd \sin \theta - j^2 d^2 \cos^2 \theta / 2r_0. \quad (4)$$

С учетом выражений (4) элементы вектор-столбца апертурных функций (3) имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi_j(\theta, r) &= \exp\left(i\pi \frac{j^2 d^2}{r_0 c} f \cos^2 \theta - i2\pi f \frac{jd}{c} \sin \theta\right) = \\ &= \exp[i2\pi \alpha(r) - i2j\beta], \quad j = 1, \dots, M, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha(r) = j^2 d^2 f \cos^2 \theta / 2r_0 c$, $\beta = jdf \sin \theta / c$.

Из выражения (5) следует, что при нахождении цели в зоне Френеля апертурные функции $\varphi_j(\theta, r)$ зависят не только от угла прихода сигнала θ , но и от расстояния до цели r_0 . При этом антенна будет фокусироваться в точки кривой, описываемой уравнением $r = r_n \cos^2 \theta$, где r_n — расстояние по нормали до центра антенны.

Пусть корреляционная матрица шума в полосе Δf на частоте f_0 равна $R_0 = \delta^2 I_M$, где δ^2 — дисперсия шума, I_M — единичная матрица размерности M . Тогда для фиксированного радиуса фокусировки r и угла θ с учетом условия (1) можно преобразовать плотность вероятности (2) к виду:

$$\begin{aligned} p(X|r, \theta) &= \int p(X|r, \theta, Y) p(Y) dY = \\ &= \gamma \exp\left\{ \frac{2\rho^2 \overline{X^T} \Phi \overline{\Phi^T} X}{\delta^2 (1 + 2\rho^2 M)} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где γ — нормировочный коэффициент, не зависящий от r , $\rho = \sigma/\delta$ — отношение сигнал/помеха с направления θ на частоте f_0 . Скалярное произведение

$$\begin{aligned} \overline{X^T} \Phi &= \overline{\Phi^T} X = \sum_{j=1}^M x_j \varphi_j(\theta, r) = \\ &= \sum_{j=1}^M \{x_j \exp[i2\pi \alpha(r)]\} \exp(-i2\pi j\beta) \end{aligned}$$

можно рассматривать как дискретное Фурье-преобразование входного сигнала по пространству M приемников. При этом сам сигнал на j -м приемнике $\{x_j \exp[i2\pi \alpha(r)]\}$ представляет собой входной сигнал, сдвинутый на фазовый угол, определяемый кривизной фронта волны. Таким образом [4],

$$E[\overline{X^T} \Phi \overline{\Phi^T} X] = E[(\overline{X^T} \Phi)^2] = S(r, \theta),$$

где E — оператор математического ожидания, $S(r, \theta)$ — спектральная плотность мощности (периодограмма) входного сигнала при фиксированных радиусе фокусировки r и угле θ . Вычисление оценки спектральной плотности мощности может осуществляться, например, путем последовательного вычисления дискретного Фурье-преобразования по M приемникам, возведения в квадрат и усреднения [4].

С учетом изложенного выражение (6) преобразуется к виду:

$$p(X|r, \theta) = \gamma \exp\left\{ \frac{2\rho^2 S(r, \theta)}{\delta^2 (1 + 2\rho^2 M)} \right\}. \quad (7)$$

2. ОЦЕНКА ДИСТАНЦИИ ДО ЦЕЛИ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ

При приеме узкополосного сигнала от цели, находящейся в зоне Френеля, наблюдается пространственная избирательность по дальности, причем энергия сигнала имеет максимумы на расстояниях, определяемых выражением [5]:

$$R_k = L^2 / 2k\lambda, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (8)$$

где $\lambda = c/f$ — длина излучаемой волны, k — номер зоны Френеля, $L = (M - 1)d$ — база антенны.



Ширина зоны Френеля определяется выражением:

$$b_k = 2L^2/\lambda(4k - 1). \quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) справедливы лишь для значений $r \geq \sqrt[3]{L^4/(32\lambda)}$, поскольку при их выводе использо-

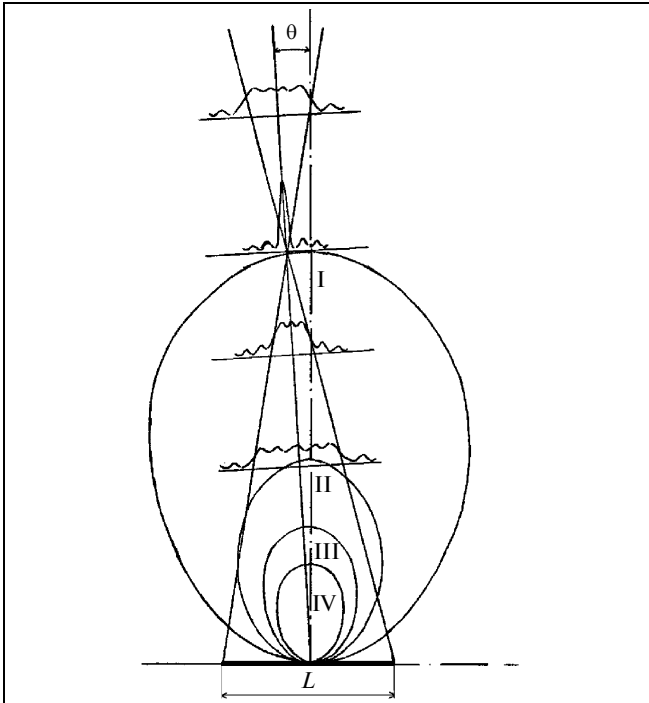


Рис. 2. Конфигурация первых четырех зон Френеля

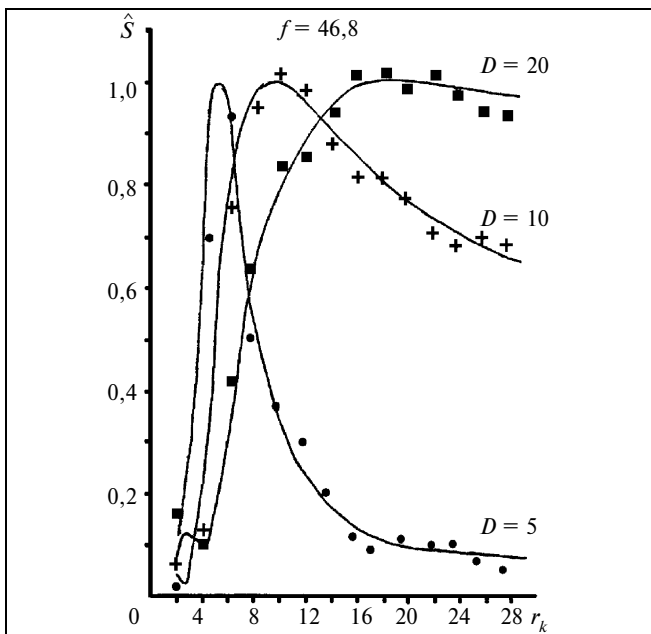


Рис. 3. Оценки энергии сигнала для различных радиусов фокусировки антенны:

■ — $D = 20$ миль (1-я зона Френеля); + — $D = 10$ миль (2-я зона Френеля); ● — $D = 5$ миль (4-я зона Френеля)

Расстояния до первой зоны Френеля $R_1(L, f)$, км

$L, \text{ м}$	$F, \text{ Гц } (\lambda, \text{ м})$			
	20(75)	50(30)	100(15)	200(7,5)
500	1,7	4,2	8,3	16,7
1000	6,7	16,7	33,3	66,7
1500	15,0	37,5	75,0	150,0
2500	41,7	104,2	208,3	416,7

валось квадратичное приближение для цилиндрического фронта волны [3]. На рис. 2 показаны первые I, II, III, IV зоны Френеля и их конфигурация в пространстве, а в таблице приведены значения $R_1(L, f)$.

Построив условную плотность вероятности (7), можно по критерию максимального правдоподобия определить дистанцию до цели. При этом аналитический поиск максимума при выполнении конкретных вычислений заменяется поиском по дискретному множеству дистанций.

Следовательно, для фиксированного вектора наблюдений X , произведя перебор по дискретному ряду радиусов фокусировки r_k при заданной частоте f_0 и вычислив оценки спектральной плотности $\hat{S}(r_k, \theta)$, отношения сигнал/помеха $\hat{\rho}$ и энергии шума $\hat{\delta}^2$ для каждого радиуса r_k , можно построить оценку плотности вероятности $p(X|r_k, \theta)$, определяемую формулой (7), в заданном диапазоне дистанций. Эти оценки используются для построения оценки плотности вероятности $\hat{p}(X|r_k, \theta)$ в дискретном ряде точек по дистанции от r_{\min} до r_{\max} , по которой можно определить оценку дистанции из условия обеспечения $\max_r p(X|r_k, \theta)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведенный алгоритм оценки дистанции до цели, находящейся в зоне Френеля, был реализован в виде программы для ЭВМ и проверен в полунатурных условиях: а именно, в качестве сигнала использовался генерируемый специальной программой модельный (синусоидальный) сигнал с заданными частотой f_0 , амплитудой A , направлением θ и дистанцией до антенны r_0 , а в качестве шума — записи шума моря, полученные с буксируемой геофизической антенны ($d = 50$ м, $M = 32$). На рис. 3 и 4 приведены некоторые результаты моделирования — по формуле (7) построены оценки спектральной плотности $\hat{S}(f_0, \theta)$ при переборе по радиусам r_k для фиксированного вектора наблюдений $\{X(t)\}$ для двух случаев:

- 1) в отсутствии шума ($\delta = 0$) — сплошные линии;
- 2) при заданном отношении сигнал/помеха ($\rho = 15$ дБ) — символы ●, +, ■.

На рис. 3 для фиксированной частоты излучения цели $f = 46,8$ Гц построены оценки (относительные) энергии сигнала при различных радиусах фокусировки ан-

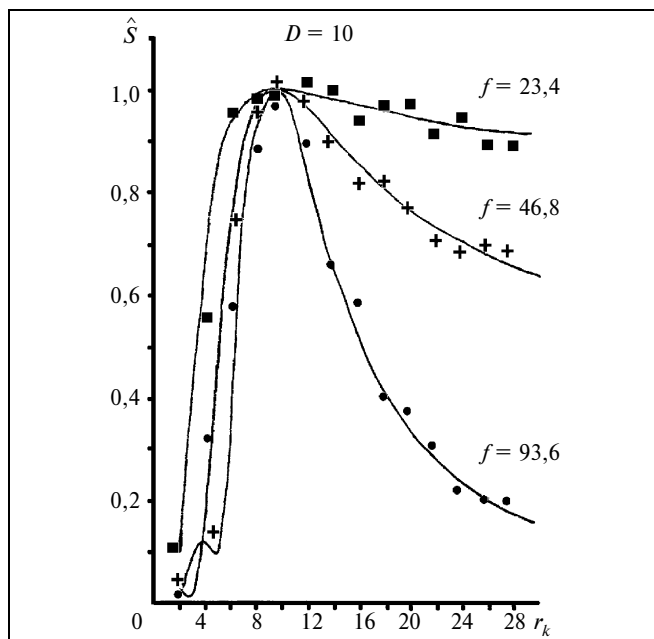


Рис. 4. Оценки энергии сигнала при различных частотах излучаемого сигнала:
 ■ — $f = 23,4$ Гц (1-я зона Френеля); + — $f = 46,8$ Гц (2-я зона Френеля); ● — $f = 93,6$ Гц (4-я зона Френеля)

тенны в диапазоне от 2 до 28 миль на различных дистанциях D до цели.

На рис. 4 для фиксированной дистанции до цели $D = 10$ миль построены оценки энергии сигнала при различных частотах сигнала.

Как видно из приведенных графиков, в отсутствие шума результаты моделирования совпадают с теоретическими, а при $\rho = 15$ дБ — близки к ним.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие узкополосной составляющей в спектре сигнала цели, находящейся в зоне Френеля приемной антенны, позволяет определять дистанцию до цели без применения триангуляционных методов определения дистанции. Точность определения дистанции определяется номером зоны Френеля, в которой находится цель, и частотой излучаемого узкополосного сигнала, а именно:

— при фиксированной частоте сигнала при уменьшении дистанции до цели точность определения увеличивается, так как цель попадает в зоны Френеля с более узкой шириной;

— при фиксированном радиусе фокусировки антенны, совпадающем с дистанцией до цели, с ростом частоты принимаемого сигнала точность определения увеличивается, так как цель также попадает в зоны Френеля с более узкой шириной зоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Найт У. Г., Придем Р. Г., Кэй С. М. Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах // ТИИЭР. — 1981. — Т. 69, № 11. — С. 84—154.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. — М.: Радио и связь, 1986. — 446 с.
3. Кремер И. Я., Понькин В. А. О потенциальной точности определения местоположения цели при пространственно-временной обработке сигналов в общем случае // Радиотехника и электроника. — 1975. — Т. XX, — № 6. — С. 1186—1193.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. — М.: Мир, 1983. — 312 с.
5. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние на статистически неоднородной поверхности. — М.: Наука, 1972. — 424 с.

☎ (495) 334-79-59;

e-mail: dobrovid@ipu.ru



Новая книга

Левин В. И. Структурно-логические методы в теории расписаний. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2006. — 176 с.

Дан обстоятельный обзор основных результатов в теории расписаний, полученных с помощью математического аппарата неперывной логики и логических определителей. Подробно излагается указанный аппарат и его применение к решению следующих задач: расчет характеристик быстродействия и загрузки систем, состоящих из последовательно соединенных блоков и получающих на входе совокупность работ, выполняемых затем в этих блоках; анализ характеристик быстродействия и загрузки систем при варьировании временных параметров работ и блоков; планирование оптимального расписания выполнения работ в системе при постоянном порядке прохождения работ через все блоки; расчет характеристик быстродействия и планирование оптимального расписания выполнения работ в системе при допустимости изменения порядка прохождения работ при переходе от одного блока к другому. Большое внимание уделено возможности вычислений в случае высокоразмерных систем, содержащих большое число блоков и работ.

Предназначена для студентов вузов, аспирантов, специалистов по управлению и планированию в экономических, социальных и технических системах.