

ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
СЕРИЯ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, вып. 13, 1984

УДК 621.396.969.11

А. П. Трифонов, А. Н. Лукин

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДАЛЬНОСТИ ДО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Определена потенциальная точность оценки дальности сложного источника при пространственно-временной обработке сигнала в предположении, что поле источника образовано суперпозицией сферических волн точечных излучателей. Показано, что дисперсия оценки дальности сложного источника при его неизвестных угловом положении и ракурсе не больше дисперсии оценки дальности точечного источника. Точность оценки дальности увеличивается, если учитывается пространственная структура источника. Экспериментально получено качественное подтверждение возможности более точного определения дальности до сложного источника, чем до точечного.

Измерение дальности до источника излучения (перезлучателя) может быть проведено в результате анализа пространственной структуры излучаемого поля [1—4]. При этом, как правило, используется информация о кривизне волнового фронта сигнала, а сам источник предполагается точечным [1—2].

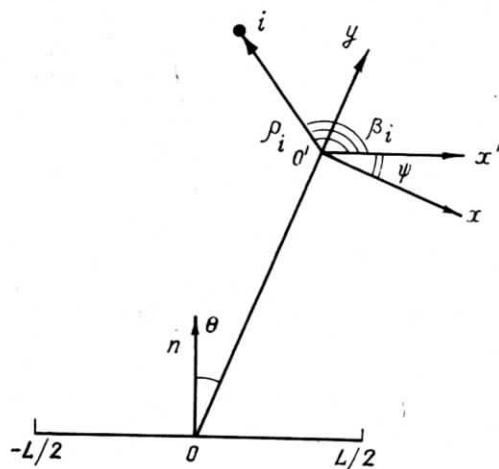


Рис. 1. Взаимное расположение линейной антенны и сложного источника

Рассмотрим задачу оценки дальности по пространственному распределению поля источника, представляющего собой совокупность точечных излучателей. Пусть источник состоит из p излучателей, находящихся в одной плоскости, а прием ведется на линейную антенну длиной L (рис. 1).

Положим, что источник излучает гармонические колебания с частотой ω_0 . Дальность до сложного источника определим как расстояние R до точки O' (см. рис. 1), относительно которой известно расположение всех излучателей источника. Обозначим через (ρ_i, β_i) координаты отдельных излучателей в полярной системе координат, начало которой совмещено с точкой O' . Ориентация источника определяется углом ψ , который образован полярной осью $O'x'$ с направлением $O'x'$, ортогональным линии визирования OO' . Поле источника в точке r приемной антенны представим в виде суперпозиции сферических волн:

$$S(t, r, q) = \sum_{i=1}^n \{x_i \cos [\omega_0(t - \tau_i)] + y_i \sin [\omega_0(t - \tau_i)]\},$$

где $q = \{R, \theta, \dots, \psi\}$ — вектор неизвестных параметров источника, среди которых дальность R , угловое положение θ , угол ориентации ψ и др. полностью или частично подлежат оценке;

$$x_i = A_i \cos \varphi_i;$$

$$y_i = A_i \sin \varphi_i;$$

A_i, φ_i — неизвестные амплитуда и фаза сигнала i -го излучателя;

$\tau_i \equiv \tau_i(r, q)$ — время распространения сигнала от i -го излучателя до точки r антенны.

Положим, что прием сигнала ведется на фоне аддитивного пространственно-временного «белого шума» $n(t, r)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Тогда на приемной антенне в течение времени $[0; T]$ наблюдается поле $\xi(t, r) = S(t, r, q_0) + n(t, r)$, где q_0 — вектор истинных значений параметров; $|r| \leq L/2$. Оценку дальности проведем по методу максимального правдоподобия [5]. После максимизации по x_i, y_i ($i = \overline{1, p}$) функционала отношения правдоподобия [5], получим формулу для определения выходного сигнала приемника:

$$M(q) = \eta(q) W^{-1}(q) \eta^+(q) / 2, \quad (1)$$

где $+$ — знак транспонирования; $\eta(q) = \{X_1(q), \dots, X_p(q), Y_1(q), \dots, Y_p(q)\}$ — вектор-строка с элементами

$$\begin{Bmatrix} X_i(q) \\ Y_i(q) \end{Bmatrix} = \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_{-L/2}^{L/2} \xi(t, r) \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} [\omega_0(t - \tau_i)] dt dr;$$

$$W(q) = \frac{LT}{N_0} \begin{Bmatrix} Q_c(q) & Q_s(q) \\ Q_s^+(q) & Q_c(q) \end{Bmatrix}$$

— матрица $2p \times 2p$; $Q_c(q) = \|Q_{cij}(q)\|$, $Q_s(q) = \|Q_{sij}(q)\|$ — матрицы $p \times p$, элементы которых равны;

$$\begin{Bmatrix} Q_{cij}(q) \\ Q_{sij}(q) \end{Bmatrix} = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} [\omega_0(\tau_i - \tau_j)] dr.$$

Оценка максимального правдоподобия q_m неизвестных параметров сложного источника определяется как положение абсолютного максимума (1). Положим, что отношение сигнал/шум $z^2 = LT \sum_{i=1}^p A_{0i}^2 / N_0$ (A_{0i} —

истинное значение мощности i -го излучателя) велико, так что $z^2 \gg 1$. Тогда, решая уравнение правдоподобия методом малого параметра [5], получаем корреляционную матрицу совместных оценок параметров q .

Соответствующий диагональный элемент матрицы описывает дисперсию оценки дальности. Общее выражение дисперсии оценки дальности для источника произвольной структуры оказывается весьма громоздким, поэтому приведем здесь дисперсию оценки дальности для источника, у которого расстояние между излучателями отвечает условию разрешения

$$a_{ij} = [\rho_i \cos(\psi_0 + \beta_i) - \rho_j \cos(\psi_0 + \beta_j)] L \cos \theta_0 / \lambda R_0 \gg 1, \quad i \neq j, \quad (2)$$

где $\lambda = \omega_0 / 2\pi c$ — длина волны;

c — скорость распространения колебаний;

R_0, θ_0, ψ_0 — истинные значения неизвестных параметров источника.

Будем также считать, что положение начала полярной системы координат, связанной с источником, соответствовало условиям

$$\sum_{i=1}^p d_i \rho_i \cos \beta_i = 0, \quad \sum_{i=1}^p d_i \rho_i \sin \beta_i = 0, \quad (3)$$

где $\alpha_i = A_{0i}^2 / \sum_{i=1}^p A_{0i}^2$ — относительная мощность i -го излучателя,

источник расположен не ближе зоны Френеля антенны, а антенна — не ближе зоны Френеля источника.

Проведя при этих предположениях параболическую аппроксимацию сферических волновых поверхностей сигналов отдельных излучателей источника, получим дисперсию оценки дальности при неизвестных θ и ψ :

$$D_p(R_m) = D_1(R_m) (1 + 60 \det I / L^2 \cos^2 \theta_0 I_{xx})^{-1}, \quad (4)$$

где $D_1(R_m) = 180 \lambda^2 R_0^4 / \pi^2 z^2 L^4 \cos^4 \theta_0$ — дисперсия оценки дальности точечного источника [3], размещенного в точке O' и обладающего мощностью, равной суммарной мощности сложного источника;

$\det I$ — определитель матрицы;

$$I = \begin{vmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{xy} & I_{yy} \end{vmatrix};$$

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^p \alpha_i \rho_i^2 \sin^2(\psi_0 + \beta_i); \quad (5)$$

$$I_{xy} = \sum_{i=1}^p \alpha_i \rho_i^2 \sin(\psi_0 + \beta_i) \cos(\psi_0 + \beta_i);$$

$$I_{yy} = \sum_{i=1}^p \alpha_i \rho_i^2 \cos^2(\psi_0 + \beta_i).$$

Численный анализ общей формулы для дисперсии оценки дальности показал, что выражение (4) обладает удовлетворительной точностью, если в (2) $a_{ij} \gg 2-3$.

По аналогии с механикой твердого тела величину α_i будем интерпретировать как приведенную массу материальной точки, совмещенной с i -м излучателем. Тогда (5) будет представлено тензором и моментами инерции дискретного твердого тела, повторяющего пространственную структуру источника. Согласно выражениям (3), (5), моменты инерции определяются относительно осей, параллельных $O'x$, $O'y$ и проходящих через центр тяжести тела. Отсюда следует, что всегда $\det I \geq 0$ и $I_{xx} \geq 0$ [6], так что дисперсия оценки дальности сложного источника не превосходит дисперсию оценки дальности точечного источника; дисперсии совпадают, если все излучатели расположены на одной прямой. Действительно, для тела, вся масса которого распределена вдоль прямой линии, $\det I = 0$ [6].

Для качественной проверки повышения точности оценки дальности сложного источника по сравнению с точечным была экспериментально определена сигнальная составляющая (1) по $R:G(R_0, R) = \langle M(q) \rangle / \langle M(q_0) \rangle$, где угловые скобки обозначают усреднение по реализациям помехи $n(t, r)$.

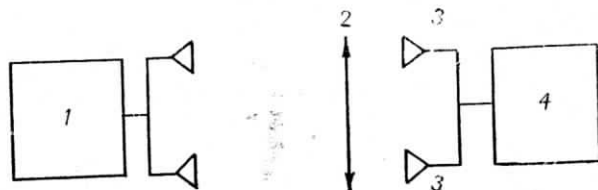


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — источник; 2 — приемное устройство; 3 — коллекторы излучения; 4 — индикатор приемного устройства

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 2. Она состоит из источника 1 (генератор и два излучателя), приемного устройства, антенна которого — диэлектрическая линза 2 диаметром $L/\lambda = 60$ с двумя коллекторами излучения 3, индикатора приемного устройства 4, регистрирующего величину напряжения, которая зависит от положения коллекторов на продольной оси линзы.

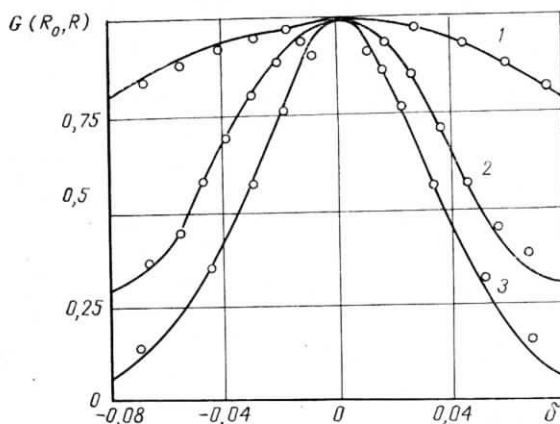


Рис. 3. Нормированная сигнальная функция по дальности сложного (1) и точечного (2, 3) источников

На рис. 3 приведена рассчитанная по формуле (1) зависимость сигнальной составляющей $G(R_0, R)$ от $\delta = (R_0 - R)/R_0$. Кривая 1 соответствует сигнальной составляющей для точечного источника, а кривые 2, 3 — для совокупности двух точечных источников при значениях $d/\lambda = 36$ и 56 (d — расстояние между источниками) соответственно. Там же нанесены экспериментальные значения сигнальной составляющей. Из рис. 3 следует, что с увеличением расстояния между излучателями пик кривой, соответствующей сигнальной составляющей сложного источника, будет более острым, чем кривой, соответствующей сигнальной составля-

ющей точечного источника. Это подтверждает возможность более точного измерения дальности сложного источника [1, 5].

Таким образом, учет пространственной структуры источника позволяет увеличить точность оценки дальности до него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. — М.: Сов. радио, 1974.
2. Кремер И. Я. Понькин В. А. — Радиотехника и электроника, 1975, т. 20, № 6.
3. Кремер А. И. Трифонов А. П. — Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 8.
4. Индзука К., Огура Х., Янь Дж. Л., Нгуен Ван Хай, Уидмак Дж. Р. — ТИИЭР, 1976, т. 64, № 10.
5. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. радио, 1978.
6. Аппель П. Теоретическая механика. — М.: Физматгиз, 1960, т. 2.

Статья поступила в мае 1983 г.
