(55) (55)

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

РАДИОТЕХНИКА
И
ЭЛЕКТРОНИКА

Том XXV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

9

МОСКВА · 1980

16 IV 1979

УДК 621.396.67.01

О ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ В ЗОНЕ ФРЕНЕЛЯ ПРИ РАЗРЫВНОМ ЗОНДИРУЮЩЕМ СИГНАЛЕ

А. П. Трифонов, В. И. Федоров

Потенциальная точность оценки координат цели, расположенной в зоне Френеля приемной антенны, рассматривалась в [1–4] и др. При этом показано, что в зоне Френеля существенно возрастает точность оценки дальности, а характеристики оценок угловых координат приблизительно такие же, как и при расположении цели в дальней зоне. Анализ точности оценки дальности в [1–4] и др. выполнен на основе формулы Крамера – Рао, неприменимой при использовании разрывных зондирующих сигналов, т. е. сигналов со скачкообразным изменением закона амплитудной или фазовой модуляции.

Рассмотрение случая разрывного зондирующего сигнала аналогично [1, 2] проведем применительно к линейной антенне длиной $2l$. Положим, что принимаемый сигнал представляет собой сферическую волну и может быть записан как [4]

$$\tilde{s}(t, x, R) = (R\rho)^{-1}\beta\tilde{U}[t-(R+\rho)/c]\exp\{j[\omega_0 t-\omega_0(R+\rho)/c-\varphi]\}, \tag{1}$$

где $\tilde{U}(t)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала; ω_0 и φ – несущая частота и начальная фаза; R – расстояние от излучателя, который совмещен с центром антенны, до цели; $\rho=(R^2+x^2-2Rx\sin\theta)^{1/2}$ – расстояние от цели до точки антенны с координатой x, $-l\leqslant x\leqslant l$; θ – угол между нормалью к центру антенны и направлением на цель; β характеризует затухание волны при распространении и отражении от цели; c – скорость распространения волны. Считаем, что сигнал (1) принимается на фоне аддитивного пространственно-временно́го белого шума с односторонней спектральной плотностью N_0, а начальная фаза случайна и распределена равновероятно в интервале $[0; 2\pi]$. Тогда модуль ненормированной комплексной функции неопределенности по дальности можно записать как

$$\Psi(R_1, R_2) = \frac{\beta^2}{N_0}\left|\int_0^T\int_{-l}^{l}(R_1R_2\rho_1\rho_2)^{-1}\tilde{U}[t-(R_1+\rho_1)/c]\times\right.$$
$$\left.\times\tilde{U}^*[t-(R_2+\rho_2)/c]\exp[j\omega_0(R_2-R_1+\rho_2-\rho_1)/c]\,dt\,dx\right|, \tag{2}$$

где T – время наблюдения, а $\rho_i=(R_i^2+x^2-2R_ix\sin\theta)^{1/2}$, $i=1,\ 2$. Выполняя в (2) интегрирование по t, получаем

$$\Psi(R_1,R_2)=\frac{2\beta^2E}{N_0R_1R_2}\left|\int\limits_{-l}^{l}(\rho_1\rho_2)^{-1}\dot{\Psi}_0[(R_2-R_1+\rho_2-\rho_1)/c]\times\right. \tag{3}$$

$$\left.\times\exp[j\omega_0(R_2-R_1+\rho_2-\rho_1)/c]\,dx\right|.$$

Здесь E – энергия зондирующего сигнала, а

$$\dot{\Psi}_0(\tau)=\int\limits_0^T\dot{U}(t)\dot{U}^*(t-\tau)\,dt\Bigg/\int\limits_0^T|\dot{U}(t)|^2\,dt \tag{4}$$

– его комплексная функция неопределенности. Заметим, что в рассматриваемом приближении дальность не является неэнергетическим параметром, как это обычно предполагается при расположении цели в дальней зоне. Как известно [5, 6], предельная точность оценки энергетического параметра определяется поведением сигнальной составляющей логарифма функционала отношения правдоподобия в малой окрестности истинного значения оцениваемого параметра R_0. Сигнальная составляющая согласно [5] определяется выражением

$$S(R)=\Psi(R_0,R)-\Psi(R,R)/2. \tag{5}$$

Ограничимся рассмотрением разрывных зондирующих сигналов, комплексная функция неопределенности которых при $\tau\to0$ допускает представление [10]

$$\operatorname{Re}\dot{\Psi}_0(\tau)=1-\delta|\tau|+o(|\tau|),\qquad \operatorname{Im}\dot{\Psi}_0(\tau)=o(|\tau|^{1/2}). \tag{6}$$

Примерами таких сигналов могут служить прямоугольный радиоимпульс, радиосигнал с фазовой манипуляцией и др. При этом для радиоимпульса с прямоугольной огибающей длительностью T_0 $\delta=1/T_0$. Для фазоманипулированного сигнала длительностью T_0 $\delta=\left(N-\sum\limits_{k=2}^{N}b_kb_{k-1}\right)\Big/T_0$, где N – основание кода; $b_k=\{-1;1\}$ – кодовая последовательность, соответствующая манипуляции фазы на π [7].

Обозначим $R=R_0+\Delta$ и исследуем поведение функции (5) при $\Delta\to0$ справа и слева раздельно. Пусть, например, $\Delta\to0$ справа, так что все время $\Delta>0$. Тогда можем записать

$$\begin{aligned}
&R^{-1}=(R_0+\Delta)^{-1}=R_0^{-1}-\Delta R_0^{-2}+o(\Delta),\\
&\rho=[(R_0+\Delta)^2+x^2-2(R_0+\Delta)x\sin\theta]^{1/2}=\rho_0+\Delta(R_0-x\sin\theta)\rho_0^{-1}+o(\Delta),\\
&\rho^{-1}=\rho_0^{-1}-\Delta(R_0-x\sin\theta)\rho_0^{-3}+o(\Delta),\\
&\exp[j\omega_0(R-R_0+\rho-\rho_0)/c]=1+j\omega_0\Delta[1+(R_0-x\sin\theta)\rho_0^{-1}]/c+o(\Delta),\\
&\rho_0=(R_0^2+x^2-2R_0x\sin\theta)^{1/2}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Подставляя (7) в (3), (5) и выполняя интегрирование по x с учетом (6), получаем

$$S(R_0+\Delta)=\Psi(R_0,R_0)/2-z^2\delta_1\Delta+o(\Delta), \tag{8}$$

где $\delta_1=\delta g(a)/c$; $\quad a=l/R_0$;

$$g(a)=\frac{1}{2a\cos\theta}\operatorname{arctg}\frac{2a\cos\theta}{1-a^2}+\frac{(1+a^2+2a\sin\theta)^{1/2}+(1+a^2-2a\sin\theta)^{1/2}}{2(1+a^4+2a^2\cos2\theta)^{1/2}},$$

а $z^2=4\beta^2El/N_0R_0^4$ — отношение сигнал/шум для принятого сигнала. Соответственно при $\Delta\to0$ слева имеем

$$S(R_0+\Delta)=\Psi(R_0,R_0)/2+z^2\delta_1\Delta+o(\Delta). \tag{9}$$

Объединяя (8) и (9), можем записать

$$S(R_0+\Delta)=\Psi(R_0,R_0)/2-z^2\delta_1|\Delta|+o(|\Delta|). \tag{10}$$

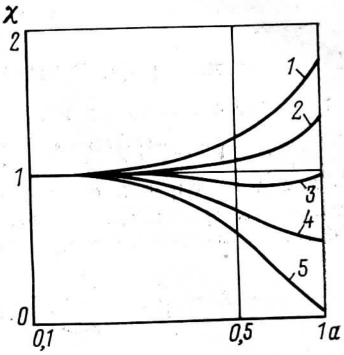
Поведение сигнальной составляющей в малой окрестности истинного значения оцениваемого параметра в рассматриваемом случае совпадает с поведением сигнальной составляющей логарифма функционала отношения правдоподобия при оценке длительности прямоугольного импульса на фоне белого шума [6]. Следовательно, аналогично [6], дисперсию оценки дальности можно получить в виде

$$D(R)=13c^2/2\delta_1{}^2z^4=13c^2/2\delta^2g^2(a)z^4. \tag{11}$$

При расположении цели в дальней зоне $(a\to 0)$ $g(a)\to 2$ и формула (11) перепишется как

$$D_0(R)=13c^2/8\delta^2z^4. \tag{12}$$

Заметим, что если в (1), (2) пренебречь различием задержек комплексной огибающей сигнала на различных элементах антенны и не учитывать зависимость амплитудного множителя $(R\rho)^{-1}$ от расстояния, как это делается в [1–3] и др., то сразу придем к формуле (12).



На рисунке приведены зависимости отношения $\chi=D(R)/D_0(R)=4/g^2(a)$ от относительного размера антенны a. Кривые *1–5* построены для значений угла $\theta=0$; 30; 45; 60; 80° соответственно. Из рассмотрения кривых рисунка следует, что оценка дальности при разрывном зондирующем сигнале в зоне Френеля по точности незначительно отличается от аналогичной оценки в дальней зоне. Уже при расстоянии до цели $R>(3-4)l$ дисперсия оценки дальности в зоне Френеля фактически совпадает с дисперсией оценки в дальней зоне.

Таким образом, оптимальная пространственно-временнáя обработка разрывных сигналов с учетом кривизны волнового фронта не улучшает существенно в отличие от [1–4] предельную точность оценки дальности. Так же, как и при локации в дальней зоне, точность оценки определяется лишь скачками законов амплитудной и фазовой модуляции [8, 9]. Действительно, нетрудно показать, что дисперсия (11), (12) обратно пропорциональна сумме квадратов скачков зондирующего сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Кремер, В. А. Понькин, Радиотехника и электроника, 1975, **20**, 6, 1186.
2. А. И. Кремер, А. П. Трифонов, Радиотехника и электроника, 1978, **23**, 3, 629.
3. А. И. Кремер, А. П. Трифонов, Радиотехника и электроника, 1978, **23**, 1, 67.
4. А. И. Кремер, А. П. Трифонов, Радиотехника и электроника, 1977, **22**, 8, 1607.
5. Е. И. Куликов, А. П. Трифонов, Оценка параметров сигналов на фоне помех, Изд. Советское радио, 1978.
6. А. П. Трифонов, Радиотехника и электроника, 1977, **22**, 1, 90.
7. Г. И. Тузов, Статистическая теория приема сложных сигналов, Изд. Советское радио, 1977.
8. И. А. Ибрагимов, Р. З. Хасьминский, Проблемы передачи информации, 1975, **11**, 3, 31.
9. Г. К. Голубев, Труды МФТИ, Серия Радиотехника и электроника, 1976, 3.
10. А. П. Трифонов, Радиотехника и электроника, 1979, **24**, 11, 2226.

Поступило в редакцию
18 IV 1979