

О.В. ЛАЗОРЕНКО, Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук

## ОСОБЕННОСТИ УРАВНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В последнее время существенно возрос интерес к использованию сверхширокополосных (СШП) сигналов для дистанционного радиозондирования различных сред и объектов [1]. Представляется целесообразным применение СШП-сигналов для радиозондирования околоземного и космического пространств. Это позволит существенно повысить разрешающую способность по дальности методов зондирования, значительно увеличить их информативность.

Нами предлагается обобщение уравнения радиолокации для случая применения СШП-сигналов при дистанционном радиозондировании распределенных целей. Различия между указанными выше уравнениями рассматриваются с использованием результатов конкретных расчетов.

### Уравнение радиолокации для СШП-сигналов

Под уравнением радиолокации в случае излучения узкополосных сигналов будем понимать соотношение вида (см., например, [2])

$$q = \frac{PG S_a \sigma}{(4\pi)^2 R^4 P_n} \quad (1)$$

Здесь  $q$  — отношение сигнал-шум на входе приемника;  $P$  — мощность излучаемого сигнала;  $G$  — коэффициент усиления передающей антенны;  $S_a$  — эффективная площадь приемной антенны;  $\sigma$  — площадь эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) цели;  $R$  — дальность радиолокационного наблюдения;  $P_n$  — мощность шумов на входе приемника.

Для СШП-сигналов общий вид уравнения (1) не изменится, но теперь функциями частоты  $f$  являются  $P$ ,  $S_a$ ,  $\sigma$ ,  $P_n$ , а в случае зондирования распределенной цели ( $L \sim R$ , где  $L$  — характерный размер

цели) — и  $R$ . Критерием оценки необходимости учета  $R$  может служить выражение

$$\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left| \frac{dR}{df} \right| df \ll R(f_0). \quad (2)$$

Здесь

$$f_{\min} = f_0 \left( 1 - \frac{\mu}{2} \right); f_{\max} = f_0 \left( 1 + \frac{\mu}{2} \right),$$

где  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$ ,  $f_0$  — минимальная, максимальная и средняя частоты функции спектральной плотности сигнала соответственно;  $\mu$  — показатель широкополосности сигнала.

При выполнении условия (2) зависимость  $R$  от  $f$  можно пренебречь. Заметим, что для точечных и локализованных целей ( $dR/df = 0$ ) или для монохроматических сигналов ( $\mu = 0$ ) условие (2) выполняется автоматически.

Запишем выражение для соотношения сигнал-шум на данной частоте:

$$\bar{q} = \frac{P(f)G(f)S_a(f)\sigma(f)}{(4\pi)^2 R^4(f)kT_n(f_0)F(f)},$$

Здесь  $P(f)$  — плотность мощности излучаемого сигнала, причем

$$P = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} P(f) df.$$

Мощность полезного сигнала на входе приемника

$$P_s = \frac{1}{(4\pi)^2} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} P(f)G(f)S_a(f) \frac{\sigma(f)}{R^4(f)} df,$$

а мощность шума определяется формулой

$$P_n = kT_n(f_0) \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} F(f) df,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T_n(f_0)$  — шумовая температура на средней частоте спектра сигнала;  $F(f)$  — безразмерная функция распределения, пропорциональная мощности шума (помехи) в зависимости от частоты. Далее будем полагать

$$F(f) = (f_0 / f)^\gamma, \quad \gamma \approx 5/2.$$

Последняя зависимость получена путем аппроксимации результатов многочисленных наблюдений и справедлива в диапазоне частот 1...1000 МГц. К тому же  $T_n(f_0)$  в этом частотном диапазоне зависит от места приема сигнала (город, пригород и т.д.). Используя равенство Парсеваля, можно показать, что

$$p(f) = \frac{2}{\tau} |S'(f)|^2.$$

Здесь  $\tau$ ,  $S'(f)$  — длительность и комплексная функция спектральной плотности сигнала. Тогда общий вид уравнения радиолокации распределенных целей в случае применения СШП-сигналов таков:

$$q = \frac{\mu f_0 \int_{-\infty}^{+\infty} |S'(f)|^2 G(f) S_a(f) \frac{\sigma(f)}{R^4} df}{(4\pi)^2 k T_n(f_0) \frac{f_0^{(1+\mu/2)}}{\int_{f_0(1-\mu/2)} F(f) df}}, \quad (3)$$

где  $\tau \approx 1/(\mu f_0)$ .

В большинстве случаев при зондировании околоземного космического пространства условие (2) выполняется, поэтому зависимостью  $R$  от  $f$  можно пренебречь. Примем, что

$$G(f) \sim f^\alpha;$$

в частности, для апертурных антенн

$$G(f) = G(f_0)(f / f_0)^2.$$

Положим, что

$$S_a \neq S_a(f); \quad \sigma(f) = \sigma(f_0)(f / f_0)^\beta; \quad S'(f) = S'(f_0)F'(f),$$

где  $F'(f)$  — безразмерная функция формы спектральной плотности. Тогда (3) можно переписать в виде

$$q = q(f_0, R, \mu, \alpha, \gamma, \beta) = q_0(\mu, f_0, R)F_1(\mu, \gamma)F_2(\mu, \alpha, \beta). \quad (4)$$

Здесь

$$q_0(\mu, f_0, R) = \frac{P_0 G(f_0) \sigma(f_0) S_a}{(4\pi)^2 R^4 k T_n(f_0) \mu f_0};$$

$$F_1(\mu, \gamma) = \frac{1}{2^{\gamma-1}} \frac{(\gamma-1)\mu}{(2-\mu)^{1-\gamma} - (2+\mu)^{1-\gamma}};$$

$$F_2(\mu, \alpha, \beta) = \frac{1}{\mu} \int_{-\infty}^{+\infty} |F'(x)|^2 x^{\alpha+\beta} dx;$$

$$x = f / f_0; \quad P_0 = \mu^2 f_0^\alpha |S'(f_0)|^2.$$

Рассмотрим физический смысл сомножителей в (4). Первый из них представляет собой отношение сигнал-шум на средней частоте сигнала. Второй учитывает зависимость от показателя  $\mu$  и модели помехи, задаваемой с помощью значения  $\gamma$ . Третий характеризует зависимость от конкретного вида модели сигнала, площади ЭПР цели и конструкции антенны.

## Различия между классическим и полученным уравнениями радиолокации

Для проведения численных расчетов выберем такую вещественную модель СШП-сигнала:

$$E_0(T) = (-1)^n (1 - |2T - 1|) \sin(2\pi n T) \Theta(T);$$

$$S'(F) = \frac{1}{\pi^2} (1 - (-1)^n \cos \pi F) \frac{nF}{(F^2 - n^2)^2};$$

$$\Theta(T) = \eta(T) - \eta(T-1); \quad T = t / \tau; \quad F = f\tau; \quad N = 2n,$$

где  $\eta(T)$  — функция Хевисайда;  $T, F, N$  — безразмерные время, частота и количество лепестков СШП-сигнала соответственно. Для простоты положим  $\alpha = 0$ .

Величина  $q/q_0$ , зависящая от  $\mu, \alpha, \beta$  и  $\gamma$ , показывает степень отличия результатов, полученных при использовании (4), от аналогичных результатов, вычисленных с помощью (1). Ее значения для разных  $\mu$  и  $\beta$  даны в таблице. Видно, что для узкополосных сигналов

$\beta$	$q/q_0$ при $\mu$ , равном								
	0,1	0,3	1,0	1,3	1,6	1,7	1,8	1,9	1,99
0	1,00	0,96	0,60	0,38	0,22	0,12	0,07	0,02	0,01
1	1,00	0,88	0,50	0,32	0,19	0,10	0,06	0,02	0,01
2	1,00	0,81	0,40	0,27	0,16	0,08	0,05	0,02	0,01

( $\mu \ll 1$ ) различие несущественно. Для СШП-сигналов ( $1 \leq \mu < 2$ ) с ростом  $\mu$  значение  $q/q_0$  резко уменьшается. Отметим, что  $q/q_0$  не зависит от  $f_0$ . Приведенные уравнения не учитывают искажения радиосигналов при распространении к цели и обратно.

При прохождении сигналов через атмосферу, ионосферу и космическое пространство дисперсионные эффекты, обусловленные зависимостью фазовой скорости, показателя поглощения и характера рассеяния на случайных неоднородностях электронной концентрации от

частоты, могут стать значительными [3 — 6]. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

## Выводы

1. Классическое уравнение радиолокации обобщено для случая радиозондирования распределенных целей с использованием СШП-сигналов.

2. Приведены простые численные модели частотной зависимости параметров, входящих в уравнение радиолокации для радиозондирования околоземного и космического пространств.

3. На примере конкретной модели СШП-сигнала показаны существенные различия между классическим и полученным уравнениями радиолокации, зависящие от показателя широкополосности сигнала.

**Список литературы:** 1. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. М.: Радио и связь, 1985. 376 с. 2. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 192 с. 3. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Дисперсионные искажения сверхширокополосных радиосигналов в неоднородных плазменных средах // 6-я Междунар. Крым. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, 16 — 19 сент. 1996 г.: Материалы конф. Севастополь, 1997. С. 404 — 406. 4. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Особенности распространения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и магнитосфере Земли // 4-я Крым. конф. и выст. "СВЧ-техника и спутниковый прием", Севастополь, 26 — 28 сент. 1994 г.: Материалы конф. Севастополь, 1994. Т.1. С. 123 — 124. 5. Лазоренко О.В. Аналитические модели сверхширокополосных сигналов и численное моделирование искажений их формы и спектрального состава // Межвуз. конф. "Применение персональных компьютеров в научных исследованиях и учебном процессе", Харьков, 23 — 25 янв. 1996 г.: Материалы конф. Х., 1996. С. 30. 6. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Численное моделирование дисперсионных искажений сверхширокополосных сигналов в плазменных средах // Там же. С. 31.

*Поступила в редколлегию 04.07.97*