УДК 621.37:621.391

В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.
Житомирський інженерно-технологічний інститут

ВИЗНАЧЕННЯ АМПЛІТУДИ СКЛАДНОГО РАДІОСИГНАЛУ З НЕВІДОМИМ ФАЗОВИМ СПЕКТРОМ

Показано, що оптимальна оцінка амплітуди складного радіосигналу з невідомим фазовим спектром при наявності адитивного шуму може бути реалізована в частотно-просторовій області визначення. Основною операцією такого аналізу є визначення частотно-просторової кореляційної функції. Визначені закон розподілу і його кількісні характеристики для оцінки амплітуди складного радіосигналу для неперервного, неперервно-дискретного та дискретно-дискретного видів аналізу.

В сучасних радіоелектронних системах актуальною є задача визначення параметрів радіосигналів шляхом аналізу їх спектра при наявності завад [1, 2, 3]. В умовах великої апріорної невизначеності задачу аналізу радіосигналів необхідно розв'язувати за умови відсутності апріорних відомостей про форму сигналу і закон модуляції його миттєвої фази, тобто в умовах невідомого фазового спектра.

Розглянемо задачу визначення амплітуди дійсного радіосигналу $S(t,\lambda,\varphi(f),A)$, що приймається в адитивній суміші $U(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n(t)$ впродовж часового інтервалу $t\in[0,T_a]$. Шум $n(t)$ та сигнал $S(t,\lambda,\varphi(f),A)$ є обмеженими по смузі частот $\{f_H,f_B$. Вихідні умови запишемо таким чином:

$$U(t)=S(t,\lambda,\varphi(f),A)+n(t), \tag{1}$$

де A – апріорі невідома амплітуда складного радіосигналу, що є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини ймовірності в інтервалі $[A_H,A_B]$;

$S(t,\lambda,\varphi(f),A)$ – відома детермінована функція аргументів t, λ, $\varphi(f)$, A, що має вигляд:

$$S\left(t,\lambda,\varphi\left(f\right),A\right)=A\cdot a\left(t,\lambda\right)\cdot\cos\left(2\pi ft+\gamma\left(t,\lambda\right)+\varphi\right),$$

де $a(t,\lambda)$, $\gamma(t,\lambda)$ – детерміновані функції, що відображають закони амплітудної та фазової модуляції;

$\lambda=\{\lambda_i\}_{i=\overline{1,m}}$ – вектор параметрів, від яких залежить радіосигнал, значення яких відомі;

$\varphi(f)$ – невідомий фазовий спектр радіосигналу.

Нехай апріорі відомі всі необхідні імовірнісні характеристики шуму $n(t)$:

M_n, $Д_n$ – відповідно математичне очікування та дисперсія шуму $n(t)$, зазвичай $M_n=0$;

$N=\text{const}$ – двостороння спектральна густина потужності шуму $n(t)$.

Необхідно оптимальним чином визначити значення амплітуди A за прийнятою реалізацією $U(t)$ в інтервалі $[0,T_a]$. Для наших умов аналізу невідомим є значення коефіцієнта пропорційності A та конкретне значення фазочастотного спектра $\varphi(f)$. Форма амплітудного спектра $S(f)$ складного радіосигналу відома, відомі також його інші параметри: $\lambda=\{\lambda_i\}_{i=\overline{1,m}}$.

У часовій області визначення поставлена задача розв'язується оптимальним чином на основі кореляційного аналізу з виключенням супроводжуючих параметрів [4, 5].

Розв'яжемо цю задачу в частотній області визначення, коли обробці підлягає спектр прийнятої суміші $U(t)$.

Розглянемо випадок безперервно-безперервного аналізу [6], при якому в частотній області визначення аналізується комплексна спектральна густина $U(jf)$ прийнятої суміші, яку можна записати у вигляді:

$$U(jf)=S(jf,A)+n(jf), \tag{2}$$

де $S(jf,A)$, $n(jf)$ – відповідно комплексні спектральні густини корисного сигналу $S(t,\lambda,\varphi(f),A)$ та шуму $n(t)$;

$S(jf,A) = A \cdot S(f) \cdot \exp(j \cdot \varphi(f)) = A \cdot S_0(jf)$.

Для розв'язання поставленої задачі визначення параметрів радіосигналів, що задані в частотній області визначення, в загальному випадку доцільно використовувати відповідну частотну функцію правдоподібності і на її основі визначати розподіл апостеріорної ймовірності значень параметрів. За оцінку параметра приймається найбільш вірогідне його значення [3, 6].

В нашому випадку апостеріорна ймовірність амплітуди $P_{ps}(A)$ дорівнює:

$$P_{ps}(A) = K_н \cdot P_{pr}(A) \cdot L_f(A), \tag{3}$$

де: $L_f(A)$ – частотна функція правдоподібності амплітуди;

$P_{pr}(A)$ – апріорна густина розподілу ймовірності амплітуди;

$$K_н = \left[\int_{A_H}^{A_B} P_{pr}(A) \cdot L_f(A) df \right]^{-1}.$$

Визначимо функцію правдоподібності $L_f(A)$, яка в загальному випадку дорівнює:

$$L_f(A) = K_{Lн} \cdot \exp\left(-\frac{E_S}{4N}\right) \cdot \exp\left\{ \frac{1}{N} \int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(U(jf) \cdot S^*(jf, A)\right) df \right\}, \tag{4}$$

де: E_S – енергія корисного радіосигналу;

$S^*(jf,A)$ – спряжена комплексна густина корисного радіосигналу;

$K_{Lн}$ – коефіцієнт пропорційності.

Оптимальна оцінка амплітуди дорівнює:

$$\overline{A} = \max_A \left\{ \frac{K_н}{(A_B - A_H)} \cdot \exp\left(-\frac{E_S}{4N}\right) \cdot L_f(A) \right\} = \max_A \left\{ \int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(U(jf) \cdot S^*(jf, A)\right) df \right\}. \tag{5}$$

Розв'язком рівняння (5) є розв'язок диференціального рівняння (6):

$$\frac{d}{dA} \left\{ \int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(U(jf) \cdot S^*(jf, A)\right) df \right\} = 0. \tag{6}$$

Після відповідних перетворень і диференціювання рівняння (6) матиме вигляд:

$$\int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(\left(U(jf) - A \cdot S_0(jf)\right) \cdot S_0^*(jf)\right) df = 0. \tag{7}$$

Розв'язком рівняння (7) є шукана оцінка амплітуди $\overline{A}$:

$$\overline{A} = \frac{\int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(U(jf) \cdot S_0^*(jf)\right) df}{\int_{f_H}^{f_B} S_0^2(jf) df}. \tag{8}$$

Для усунення апріорної статистичної невизначеності часового фазового спектра $\varphi(f)$ використовуємо апріорі відомий просторовий або груповий фазочастотний спектр $\varphi(f) = \lambda(f)$, для якого $P_{pr}(\varphi_0(f)) = 1$ [7]. Таким чином рівняння (8) може бути записано як:

$$\overline{A} = \frac{\int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(U(jf,\lambda) \cdot S_0^*(jf,\lambda)\right) df}{\int_{f_H}^{f_B} S_0^2(jf,\lambda) df} = \frac{\int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(U(f) \cdot S_0(f) \cdot \exp j\left(\lambda_U(f) - \lambda_S(f)\right)\right) df}{\int_{f_H}^{f_B} S_0^2(jf,\lambda) df} = \frac{E_{SU}}{E_{S0}}, \tag{9}$$

де $U(f)$, $S_0(f)$ – відповідно амплітудно-частотні спектри прийнятої суміші та корисного радіосигналу;

$\lambda_U(f)$, $\lambda_S(f)$ – відповідно групові фазочастотні спектри прийнятої суміші та корисного радіосигналу;

$E_{S0} = \int_{f_H}^{f_B} S_0^2(jf,\lambda)df$ – енергія корисного радіосигналу з амплітудою $A = 1$;

$E_{SU} = \int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}(U(f)\cdot S_0(f)\cdot \exp j(\lambda_U(f) - \lambda_S(f)))df$ – взаємна енергія прийнятої суміші і корисного радіосигналу з амплітудою $A = 1$.

Визначимо математичне очікування та дисперсію оцінки $\overline{A}$ амплітуди радіосигналу. Враховуючи рівняння (1) і (2), маємо:

$$E_{SU} = \int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(A\cdot S_0^2(jf,\lambda) + n(jf,\lambda)\cdot S_0^*(jf,\lambda)\right)df =$$

$$= A\cdot E_{S0} + \int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(n(jf,\lambda)\cdot S_0^*(jf,\lambda)\right)df. \tag{10}$$

З урахуванням (10), рівняння (9) матиме вигляд:

$$\overline{A} = A + \frac{\int_{f_H}^{f_B} \mathrm{Re}\left(n(jf,\lambda)\cdot S_0^*(jf,\lambda)\right)df}{E_{S0}}. \tag{11}$$

Аналіз рівняння (11) показує, що функція $\overline{A}$ є випадковою з нормальним законом розподілу густини ймовірності своїх значень і з такими параметрами розподілу:

$$m_A = A, \quad D_A = \frac{N}{E_{S0}}, \tag{12}$$

де m_A – математичне очікування;

D_A – дисперсія.

Таким чином, отримана оцінка $\overline{A}$ амплітуди складного радіосигналу з невідомим фазовим спектром є незміщеною і ефективною.

Аналіз рівняння (12) показує, що точність визначення амплітуди запропонованим методом співпадає з відомими оцінками при обробці повністю відомих радіосигналів у часовій області визначення [4, 8].

Для дискретно-дискретного та безперервно-дискретного прийомів радіосигналу рівняння (9) має вигляд:

$$\overline{A} = \frac{\sum_{k=m_1}^{k=m_2} \mathrm{Re}\left(U(jf_k,\lambda_k)\cdot S_0^*(jf_k,\lambda_k)\right)}{\sum_{k=m_1}^{k=m_2} S_0^2(jf_k,\lambda_k)}, \tag{13}$$

де: k – цілі числа, $k \in \{m_1, m_2\}$;

$m_1 = E_Ц\left[\frac{f_H}{\Delta f}\right]$;

$m_2 = E_Ц\left[\frac{f_B}{\Delta f}\right]$;

$E_Ц[\bullet]$ – функція виділення цілої частини;

Δf – значення дискрета по частоті;

$U(jf_k,\lambda_k)$, $S_0^*(jf_k,\lambda_k)$ – відповідні дискретні відліки модифікованих спектрів суміші та корисного сигналу.

Таким чином, задачу визначення амплітуди частково невідомого у часовій області складного радіосигналу при наявності адитивного шуму можливо оптимально розв'язати, виконуючи частотний кореляційний аналіз прийнятої реалізації в частотно-груповій або частотно-просторовій областях визначення без зниження достовірності в порівнянні з відомими методами часової обробки. Основною операцією такого аналізу є визначення частотно-групової кореляційної функції. При цьому кількісні імовірнісні характеристики операції аналізу в частотній області визначення співпадають з відомими значеннями характеристик операцій аналізу амплітуди в часовій області визначення для випадку апріорі відомого радіосигналу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Гуткин Л.С.* Проектирование радиосистем и радиоустройств. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. *Ципоренко В.Г., Ципоренко О.Д.* Космічні радіоелектронні системи з частотною обробкою сигналів / Сучасні технології в аерокосмічному комплексі: Матеріали V Міжнар. наук.-практичної конф. – Житомир, 2001. – С. 145–153.
3. Радиотехничесские системы / Под ред. Ю.И. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 486 с.
4. *Тихонов В.И.* Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
5. *Гуткин Л.С.* Теория оптимальных методов радиоприёма при флуктуационных помехах. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Сов. радио, 1972. – 448 с.
6. *Ципоренко В.Г.* Виявлення радіосигналів з невідомим фазовим спектром // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № 3/22 / Технічні науки. – С. 94–98.
7. *Ципоренко В.Г.* Визначення апостеріорної ймовірності радіосигналу в частотній області // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 13 / Технічні науки. – С. 87–91.
8. *Куликов Е.И., Трифонов А.П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.

ЦИПОРЕНКО Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрової обробки сигналів.

Подано 7.09.2002