

УДК 621.37:621.391

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

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ У ЧАСІ СКЛАДНОГО РАДІОСИГНАЛУ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ЙОГО СПЕКТРА

Показано, що оптимальна оцінка положення у часі складного радіосигналу при наявності адитивного шуму може бути реалізована в частотній області визначення. Основною операцією такої оцінки є частотний квадратурний кореляційний аналіз. Визначені закон розподілу і його кількісні характеристики оцінки положення у часі 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].

Розглянемо задачу визначення затримки дійсного радіосигналу $S(t, \tau)$, 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 $S(t, \tau)$ є обмеженими по смузі частот $\{f_H, f_B\}$. Вихідні умови запишемо таким чином:

$$U(t) = S(t, \tau) + n(t), \quad (1)$$

де τ – апіорі невідома затримка радіосигналу, що є випадковою величиною з рівномірним розподілом густини ймовірності в інтервалі $[0, \tau_{\max} < T_a]$;

$S(t, \tau)$ – відома детермінована функція часу, що має вигляд:

$$S(t, \tau) = A(t - \tau) \cdot \cos(2\pi f(t - \tau) + \gamma(t - \tau) + \varphi),$$

де $A(t)$, $\gamma(t)$ – детерміновані функції, що відображають закони амплітудної та фазової модуляції відповідно.

Нехай апіорі відомі всі необхідні ймовірні характеристики шуму $n(t)$:

M_n , D_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 часу затримки τ за реалізацією $U(t)$, що прийнята в інтервалі $[0, T_a]$.

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

Розв'яжемо цю задачу в частотній області, коли обробці підлягає спектр прийнятої суміші $U(jf)$.

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:

$$U(jf) = S(jf, \tau) + n(jf), \quad (2)$$

де $S(jf, \tau)$, $n(jf)$ – відповідно комплексні спектральні густини корисного сигналу $S(t, \tau)$ та шуму $n(t)$.

Для розв'язання 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.

В нашому випадку апостеріорна ймовірність часу затримки $P_{ps}(\tau)$ дорівнює [6]:

$$P_{ps}(\tau) = K_n \cdot P_{pr}(\tau) \cdot L_f(\tau), \quad (3)$$

де $L_f(\tau)$ – частотна функція правдоподібності часу затримки;

$P_{pr}(\tau)$ – апіорна густина розподілу ймовірності часу затримки;

$$K_n = \left[\int_{-\pi}^{\pi} P_{pr}(\tau) \cdot L_f(\tau) df \right]^{-1}.$$

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

$$L_f(\tau) = K_{Ln} \cdot \exp\left(-\frac{E_s}{4N}\right) \cdot \exp\left\{\frac{1}{N} \int_{f_n}^{f_B} \operatorname{Re}(U(jf) \cdot S^*(jf, \tau)) df\right\}, \quad (4)$$

де: E_s – енергія корисного сигналу;

$S^*(jf, \tau)$ – спряжена комплексна спектральна густина корисного сигналу;

K_{Ln} – коефіцієнт пропорційності.

При незмінній енергії сигналу $E_s = \text{const}$ оптимальна оцінка часу затримки дорівнює:

$$\bar{\tau} = \max_{\tau} \left\{ \frac{K_n}{(\tau_{\max} - \tau_{\min})} \cdot \exp\left(-\frac{E_s}{4N}\right) \cdot L_f(\tau) \right\} = \max_{\tau} \left\{ \int_{f_n}^{f_B} \operatorname{Re}(U(jf) \cdot S^*(jf, \tau)) df \right\}. \quad (5)$$

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

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ \int_{f_n}^{f_B} \operatorname{Re}(U(jf) \cdot S^*(jf, \tau)) df \right\} = 0. \quad (6)$$

Спектральну густина корисного сигналу $S(jf, \tau)$ доцільно представити через амплітудний $S(f)$ та фазовий (f, τ) спектри відповідно:

$$S(jf, \tau) = S(f) \cdot e^{j\varphi(f, \tau)}, \quad (7)$$

де: $S(f) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(S(jf, \tau)) + \operatorname{Im}^2(S(jf, \tau))}$;

$$(f, \tau) = -\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(S(jf, \tau))}{\operatorname{Re}(S(jf, \tau))}.$$

Враховуючи рівняння (1), маємо:

$$(f, \tau) = \Psi_0(f) - 2\pi f \tau, \quad (8)$$

де: $\Psi_0(f)$ – фазовий спектр корисного сигналу при нульовій затримці $\tau = 0$.

З урахуванням рівнянь (7) та (8) після відповідних перетворень і диференціювання рівняння (6) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & \int_{f_n}^{f_B} \operatorname{Re}\{U(jf) \cdot \{j2\pi f \cdot S(f) \cdot \exp(-j\Psi_0(f)) \cdot \exp(j2\pi f \tau)\}\} df = \\ & = \int_{f_n}^{f_B} \operatorname{Re}\{P(jf) \cdot U(jf) \cdot \exp(j2\pi f \tau)\} df = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де: $P(jf) = j2\pi f \cdot S(f) \cdot \exp(-j\Psi_0)$.

Аналіз рівняння (9) показує, що воно є записом зворотного перетворення Фур'є сигналу зі спектром $\{P(jf) \cdot U(jf)\}$:

$$U(f) = F^{-1}\{P(jf) \cdot U(jf)\},$$

де F^{-1} – оператор оберненого перетворення Фур'є.

Відповідно до цього, рівняння (5) може бути записано також у вигляді:

$$\bar{\tau} = \max_{\tau} \{F^{-1}(P(jf) \cdot U(jf))\} \quad (10)$$

Аналіз рівнянь (9) та (10) показує, що оцінка $\bar{\tau}$ затримки корисного сигналу є гаусовою та незміщеною з дисперсією, яка, в свою чергу, дорівнює [6, 7]:

$$D_{\tau} = \left(\frac{2E_s}{N} \cdot \beta^2 \right)^{-1}, \quad (11)$$

де: E_s – енергія корисного сигналу;

$$\beta^2 = \frac{\int_{f_H}^{f_B} 2\pi f \cdot S^2(f) df}{\int_{f_H}^{f_B} S^2(f) df}.$$

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

$$\sum_{k=m_1}^{k=m_2} \operatorname{Re}\{j2\pi f_k \cdot U(jf_k) \cdot S(f_k) \cdot \exp(-j\Psi_0(f_k)) \cdot \exp(j2\pi f_k \tau)\} = 0,$$

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

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

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

Δf – значення дискрету за частотою;

$E_{II}[\bullet]$ – функція виділення цілої частини.

Реалізація оптимального визначення часу затримки τ радіосигналу може спиратися на рівняння (9) та (10). Враховуючи високу ефективність технічних засобів реалізації перетворення Фур'є [9], більш доцільним варіантом є той, що ґрунтується на проміжному оберненому перетворенні Фур'є в дискретній формі.

Таким чином, задачу визначення часу затримки радіосигналу при наявності адитивного шуму можливо оптимально розв'язати, виконуючи аналіз прийнятої реалізації в частотній області шляхом обробки її комплексного спектра. Основною операцією розв'язку цієї задачі є частотний кореляційний аналіз. При цьому кількісні характеристики похибки оцінки часу затримки при аналізі в частотній області визначення співпадають з відомими значеннями похибки в часовій області [7, 8].

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. – 4–6 вересня 2001. – Житомир, 2001. – С. 145–153.
3. Радиотехнические 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. Визначення апостеріорної ймовірності радіосигналу в частотній області // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 13 / Технічні науки. – С. 87–91.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – Т. 2. – М.: Сов. радио, 1975. – 470 с.
8. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.
9. Цифровая обработка сигналов: Опыт использования персональных ЭВМ / А.А. Иванько, В.И. Гордиенко, В.М. Соловьев, Я.А. Иванько. – К.: Техника, 1991. – 160 с.

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

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрової обробки сигналів.

Подано 09.04.2002