УДК 621.37:621.391

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

ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ЇХ СПЕКТРА

Показано, що оптимальне виявлення відомих радіосигналів при наявності адитивного шуму може бути реалізовано в частотній області. Основною операцією такого аналізу є визначення частотної кореляційної функції. Визначені кількісні характеристики операції виявлення в частотній області. Одержані основні співвідношення для неперервного, аналого-дискретного та дискретно-дискретного видів аналізу.

В сучасних радіоелектронних системах реалізується сукупність операцій пошуку, селекції, виявлення та аналізу радіосигналів [1, 2]. Зазвичай пошук та селекція радіосигналів реалізуються в частотній, часовій та просторовій областях визначення, виявлення – у часовій, а аналіз – в часовій та частотній областях. Для підвищення ефективності функціонування радіоелектронних систем в цілому актуальною є задача реалізації операції виявлення радіосигналів у частотній області [3].

Розглянемо задачу виявлення апріорі відомого радіосигналу $S(t,\lambda)$, що приймається в адитивній суміші $U(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n(t)$ впродовж часового інтервалу $t\in[0,T_н]$. Шум $n(t)$ і сигнал $S(t,\lambda)$ є обмеженими по смузі частот $\{0,f_в\}$. Вихідні умови запишемо таким чином:

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

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

$S(t,\lambda)$ – відома детермінована функція аргументів λ та t.

Для нашого випадку виявлення відомого сигналу невідомим є тільки сам факт наявності або відсутності сигналу $S(t,\lambda)$ в прийнятій суміші $U(t)$. Тому рівняння (1) доцільно записати у вигляді:

$$U(t)=\aleph\cdot S(t,\lambda)+n(t), \tag{2}$$

де $S(t,\lambda)$ – детермінований корисний сигнал, що повністю розташований на інтервалі спостереження $[0,T_н]$;

$\aleph$ – випадковий параметр, що може приймати тільки два значення: нуль або один.

Нехай відомі апріорі всі необхідні ймовірнісні характеристики випадкової величини $\aleph$ та шуму $n(t)$:

$P_{pr}(\aleph=0)$, $P_{pr}(\aleph=1)$ – відповідно апріорні імовірності відсутності та наявності радіосигналу $S(t,\lambda)$;

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

$N=const$ – двостороння спектральна щільність потужності шуму $n(t)$.

Тоді необхідно оптимальним чином визначити значення параметру $\aleph$ по прийнятій реалізації $U(t)$ в інтервалі $[0,T_н]$.

У часовій області поставлена задача вирішується оптимальним чином на основі кореляційного аналізу або узгодженої фільтрації [4, 5].

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

Розглянемо випадок безперервно-безперервного аналізу [3], при якому в частотній області аналізується спектральна щільність $U(jf)$ прийнятої суміші. Рівняння (2) можна записати так:

$$U(jf)=\aleph\cdot S(jf,\lambda)+n(jf), \tag{3}$$

де $S(jf,\lambda)$, $n(jf)$ – відповідно спектральні щільності корисного сигналу і шуму.

Для вирішення задачі виявлення радіосигналів в загальному випадку доцільно використовувати відношення правдоподібності $l_f(\aleph)$ [3], що дорівнює:

$$l_f(\aleph)=\frac{L_f(\aleph)\big|_{S(t,\lambda)\neq 0}}{L_f(\aleph)\big|_{S(t,\lambda)=0}}, \tag{4}$$

де $l_f(\aleph)$ – відношення правдоподібності в частотній області;

$L_f(\aleph)\big|_{S(t,\lambda)\neq 0}$, $L_f(\aleph)\big|_{S(t,\lambda)=0}$ – відповідно частотні функції правдоподібності при наявності та відсутності у вхідній реалізації $U(t)$ корисного сигналу.

Порівнюючи значення $l_f(\aleph)$ з порогом h, приймається рішення про наявність сигналу $S(t,\lambda)$ – при $l_f(\aleph)\geq h$, або його відсутності – при $l_f(\aleph)\prec h$:

$$l_f(\aleph)\geq\leq h. \tag{5}$$

Значення $l_f(\aleph)$ для умов поставленої задачі визначається рівнянням:

$$l_f(\aleph)=\frac{exp\left\{-\frac{1}{2N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}\left(U(jf)-S(jf,\aleph)\right)^2 df\right\}}{exp\left\{-\frac{1}{2N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}U^2(jf)df\right\}}=$$

$$=exp\left\{-\frac{E_s}{2N}\right\}\cdot exp\left\{\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(U(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df\right\}, \tag{6}$$

де $Re(\bullet)$ – функція виділення дійсної частини комплексного числа;

E_s – енергія корисного сигналу;

$S^*(jf,\lambda)$ – комплексно-спряжений спектр корисного сигналу.

Експоненціальна функція є монотонною від свого аргументу, тому рівняння (6) доцільно представити в логарифмічному масштабі:

$$ln\, l_f(\aleph)=-\frac{E_s}{2N}+\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(U(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df\geq\leq ln\, h. \tag{7}$$

Спростивши вираз (7), отримуємо:

$$\mu(f,\aleph)=\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(U(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df\geq\leq\frac{E_s}{2N}+ln\, h=h_1, \tag{8}$$

де $h_1=\frac{E_s}{2N}+ln\, h$ – еквівалентне значення порога прийняття рішення про виявлення;

$\mu(f,\aleph)$ – частотна кореляційна функція.

Аналіз рівняння (8) показує, що базовою операцією при оптимальному виявленні сигналу $S(t,\lambda)$ в частотній області є визначення значення частотної кореляційної функції $\mu(f,\aleph)$.

Визначимо кількісні характеристики оптимального виявлення, що реалізується в частотній області, наприклад, для випадку використання критерію Неймана–Пірсона [4]. Для цього визначимо закон розподілення та параметри розподілення щільності імовірностей гіпотез: $Г_1$ – наявності сигналу та $Г_0$ – його відсутності.

Для випадку наявності сигналу $S(t,\lambda)$ маємо:

$$\mu\big|_{Г_1}=\mu_1=\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(\left(S(jf,\lambda)+n(jf)\right)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df=$$

$$=\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(S(jf,\lambda)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df+\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(n(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df. \tag{9}$$

Перший доданок рівняння (9) є апріорі відомою величиною з постійним значенням:

$$\frac{1}{N}\int\limits_{-f_в}^{f_в}Re\left(S(jf,\lambda)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df=\frac{E_s}{N}.$$

Значення другого доданку рівняння (9) є випадковою величиною з нормальним законом розподілу щільності імовірності $p_0(\mu)$ і відповідними параметрами розподілу: математичне сподівання $m_\mu=0$, дисперсія $Д_\mu=\frac{E_s}{N}$.

В цілому значення функції μ_1 також є випадковою величиною, щільність імовірності якої розподілена за нормальним законом з відповідними параметрами: математичним сподіванням $m_1 = \frac{E_s}{N}$, дисперсією $Д_1 = \frac{E_s}{N}$.

Для випадку відсутності сигналу $S(jf, \lambda)$ в суміші $U(jf)$ маємо:

$$\mu\big|_{\Gamma_0} = \mu_0 = \frac{1}{N}\int_{-f_в}^{f_в} Re\left(n(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df \ . \tag{10}$$

Значення μ_0 є випадковою величиною, закон розподілу щільності її імовірності – нормальний з відповідними параметрами: математичним сподіванням $m_0 = 0$, дисперсією $Д_0 = \frac{E_s}{N}$.

Відповідно до критерію Неймана–Пірсона апріорі задається необхідна вірогідність хибної тривоги $p_{нт}$:

$$p_{нт} = \int_h^\infty p_0(\mu)d\mu = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sqrt{\frac{E_s}{N}}}\right), \tag{11}$$

де $\Phi(x)$ – інтеграл імовірностей,
а імовірність $p_{пв}$ правильного виявлення сигналу $S(jf, \lambda)$ знаходиться як

$$p_{пв} = \int_h^\infty p_1(\mu)d\mu = 1 - \Phi\left(-\frac{h}{\sqrt{\frac{E_s}{N}}} - \sqrt{\frac{E_s}{N}}\right). \tag{12}$$

Аналіз рівнянь (11) і (12) показує, що вони співпадають з відомими рівняннями для імовірностей $p_{нт}$ та $p_{пв}$ у випадку виявлення сигналу в часовій області [4]. Тому необхідні значення порогу h та відношення сигнал/шум $\frac{E_s}{N}$ розраховуються за відомими співвідношеннями для часової кореляційної обробки [4, 5].

Апаратурно аналізатори спектра для дійсних сигналів визначають спектр тільки для додатних частот. Тому співвідношення (6) для дійсних сигналів $S(t, \lambda)$ доцільно записати у вигляді:

$$l_f(\aleph) = exp\left\{-\frac{E_s}{2N}\right\}\cdot exp\left\{\frac{2}{N}\int_0^{f_в} Re\left(U(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df\right\}. \tag{13}$$

При обробці дійсних сигналів на проміжній частоті смуга частот, для яких визначені сигнал $S(t, \lambda)$ та шум $n(t)$, становить $\{f_н, f_в\}$, де $f_н \succ 0$; $f_н \prec f_в \prec \infty$. Для цього випадку рівняння (6) прийме вигляд:

$$l_f(\aleph) = exp\left\{-\frac{E_s}{2N}\right\}\cdot exp\left\{\frac{2}{N}\int_{f_н}^{f_в} Re\left(U(jf)\cdot S^*(jf,\lambda)\right)df\right\}. \tag{14}$$

Для випадків дискретно-дискретного аналізу та безперервно-дискретного аналізу сигналів у частотній області [3] співвідношення (6) та (8) відповідно набудуть вигляду:

$$l_f(\aleph) = exp\left\{-\frac{E_s}{2N}\right\}\cdot exp\left\{\frac{1}{N}\sum_{k=-\frac{M}{2}}^{k=\frac{M}{2}-1} Re\left(U(jf)\cdot S^*(jf_к,\lambda)\right)\right\} =$$

$$= exp\left\{-\frac{E_s}{2N}\right\}\cdot exp\left\{\frac{2}{N}\sum_{k=0}^{\frac{M}{2}-1} Re\left(U(jf_к)\cdot S^*(jf_к,\lambda)\right)\right\}; \tag{15}$$

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{k=-\frac{M}{2}}^{k=\frac{M}{2}-1} Re\left(U\left(jf_{к}\right)\cdot S^{*}\left(jf_{к},\lambda\right)\right) =$$

$$= \frac{2}{N}\sum_{k=-\frac{M}{2}}^{k=\frac{M}{2}-1} Re\left(U\left(jf_{к}\right)\cdot S^{*}\left(jf_{к},\lambda\right)\right) \geq\leq \frac{E_s}{2N} + ln\,h = h_1\,, \qquad (16)$$

де k – ціле число;

M – кількість гармонік у частотній області визначення.

Таким чином, задачу виявлення апріорі відомого сигналу при наявності адитивного шуму можливо оптимально вирішити, використовуючи аналіз прийнятої реалізації в частотній області. Основною операцією такого аналізу є визначення частотної кореляційної функції. При цьому кількісні характеристики операції виявлення в частотній області співпадають з відомими значеннями характеристик операції виявлення в часовій області.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Гуткин Л.С.* Проектирование радиосистем и радиоустройств. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.: ил.
2. *Комиссаров Ю.А., Родионов С.С.* Помехоустойчивость и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – К.: Техніка, 1978. – 208 с.
3. *Ципоренко В.Г.* Визначення апостеріорної ймовірності радіосигналу в частотній області // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 13/Технічні науки. – С. 87–91.
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.: Советское радио, 1972. – 448 с.

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

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрової обробки сигналів.

ЦИПОРЕНКО Олена Дмитрівна – інженер-патентознавець Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– цифрові радіотехнічні пристрої.

Подано 19.10.2000