

В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

**ПРОСТОРОВО-СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШИРИНИ СПЕКТРА РАДІОВИПРОМІНЮВАНЬ**

*Показано, що оптимальний аналіз ширини спектра радіосигналів з невідомим фазовим спектром при наявності адитивного шуму джерел радіовипромінювань з невідомими координатами може бути реалізовано в частотно-просторовій області визначення. Основною операцією такого аналізу є визначення квадратурної частотно-просторової кореляційної функції. Визначені кількісні характеристики операції аналізу ширини спектра в частотно-просторовій області.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** На сьогодні ефективність використання радіочастотного ресурсу забезпечується підвищенням стабільності частотних параметрів радіоелектронних засобів та оперативним їх контролем при радіомоніторингу. Підконтрольні параметри зазвичай поділяють на загальні та спеціальні, до яких відноситься несуча частота, ширина зайнятої смуги частот, рівень сигналу, а також швидкість передачі інформації та параметри модуляції. Більшість сучасних методів контролю цих параметрів є енергетичними, реалізуються в часовій або частотній області визначення та вимагають великого відношення сигнал/шум [1, 2, 5]. Тому при радіоконтролі широкосмугових випромінювань ефективність цих методів суттєво знижується, зумовлюючи відносно великі похибки [3, 5]. Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є використання спектрально-просторових методів обробки радіовипромінювань які передбачають одночасний аналіз їх спектральних та просторових характеристик [6, 8].

Точність аналізу параметрів радіосигналів безпосередньо впливає на точність радіомоніторингу, а також на ефективність використання РЧР. Тому підвищення точності аналізу радіосигналів в системах радіомоніторингу в складній електромагнітній обстановці є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми.**

В роботах [1, 4] виконано порівняльний аналіз прямих методів вимірювання ширини спектра, таких як відношення потужностей, контролю по заданому рівню та заміщення. Дані методи передбачають обробку тільки енергетичного спектра радіовипромінювань, але не враховують усю доступну його енергію, що зумовлює їх недостатню точність та завадостійкість.

В роботах [1, 3] виконано аналіз побічних методів вимірювання ширини спектра радіовипромінювань, таких як оцінки затухання спектра поза смугою пропускання, оцінки середньоквадратичного значення девіації частоти, та часу наростання імпульсів. Дані методи передбачають багатетапну обробку часових реалізацій радіовипромінювань та використовують їх енергію частково, що зумовлює їх вузьку спеціалізацію щодо виду модуляції та відносно невелику точність.

В роботах [5, 7] виконано аналіз статистичних методів вимірювання ширини спектра радіовипромінювань, використовуючи аналіз автокореляційної функції в часовій області. Недоліком методів даної групи є недостатня завадостійкість і необхідність апріорних даних щодо розподілу густини імовірності миттєвих значень випромінювань, що зумовлені необхідністю врахування максимальної потужності шумів в межах смуги пропускання каналів радіоприйому.

В роботах [6, 8] наведені результати досліджень методів аналізу радіовипромінювань шляхом обробки їх спектра та просторових характеристик. Недоліком запропонованих методів аналізу є недостатня завадостійкість, що зумовлена алгоритмами прийняття рішень при вимірюванні ширини спектра з урахуванням потужності тільки окремих спектральних складових, що має особливе значення при обробці широкосмугових радіовипромінювань.

В роботі [11] запропоновано алгоритм аналізу ширини спектра радіовипромінювань з урахуванням їх відомих просторових характеристик. Однак для умов невідомих просторових характеристик радіовипромінювань вказана задача не вирішена.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми аналізу ширини спектра радіовипромінювань є їх аналіз з урахуванням їх просторових характеристик і використанням повної енергії прийнятої реалізації за умов невідомих координат їх джерел.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Відповідно до невирішених раніше частин загальної проблеми вимірювання ширини спектра радіовипромінювань з урахуванням їх просторових

параметрів, цілями статті є: дослідження оптимальних методів спектрально-просторової обробки при вимірюванні ширини спектра радіосигналу при невідомих координатах його джерела та отримання їх кількісних характеристик, що характеризують ефективність аналізу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо задачу оцінки ширини спектра радіосигналу  $S(t, \lambda, \varphi(f))$  з невідомим фазовим спектром, що приймається з невідомого напрямку  $\theta$  та в адитивній суміші  $U(t)$  зі статистично незалежним білим гаусовим шумом  $n(t)$  впродовж часового інтервалу  $t \in [0, T_a]$ . Шум  $n(t)$  і сигнал  $S(t, \lambda, \varphi(f))$  є обмеженими по смузі частот  $\{f_n, f_e\}$ . Вихідні умови задамо таким чином:

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

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

$\varphi(f)$  – фазочастотний спектр радіосигналу, що є випадковою функцією з довільним відомим законом розподілу у часі.

$S(t, \lambda, \varphi(f))$  – відома детермінована функція аргументів  $t, \lambda$  та  $\varphi(f)$ :

$$S(t, \lambda, \varphi(f)) = A(t, \lambda, \varphi(f)) \cdot \cos(2\pi ft + \gamma(t, \lambda, \varphi(f)) + \varphi), \tag{2}$$

де  $\varphi$  – початкова фаза.

Нехай є відомим амплітудний спектр корисного радіосигналу, обвідна якого є гаусовою функцією:

$$S(f) = S_0 \cdot \exp[-\pi / 2 (\frac{f - f_0}{\Delta f_0})^2], \tag{3}$$

де:  $f_0$  – частота, що відповідає середині спектра, при цьому  $f_n < f_0 < f_e$ ;

$$\Delta f_0 = \int_{f_n}^{f_e} S^2(f) \cdot df \text{ – ширина спектра;}$$

$S_0$  – максимальне значення обвідної спектра.

Будемо вважати, що спектр радіосигналу практично повністю розташований в межах смуги аналізу  $\{f_n, f_e\}$ .

Нехай відомі апіорі всі необхідні ймовірнісні 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  $n(t)$ .

Для визначених умов необхідно оптимальним чином визначити значення ширини спектра  $\Delta f_0$  по прийнятій реалізації  $U(t)$  в інтервалі  $[0, T_a]$ .

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

Розглянемо випадок безперервно-безперервного аналізу [3, 4], при якому в частотній області визначення аналізується спектральна густина  $U(jf)$  прийнятої суміші, яку можна записати з використанням перетворення Фур'є у вигляді:

$$U(jf) = S(jf, \lambda) + n(jf), \tag{4}$$

де:  $S(jf, \lambda), n(jf)$  – відповідно комплексні спектральні густини корисного сигналу і шуму;

$$S(jf, \lambda) = S(f, \lambda) \cdot e^{j\varphi(f)}.$$

Для локалізованих просторово та стаціонарних радіоелектронних засобів основною інформаційною властивістю радіосигналів є апіорна незалежність від часу та частоти їх просторових параметрів  $\lambda(\theta)$ , таких, наприклад, як напрямок приходу або пеленг, кут місця, поляризація та інші, тобто  $\lambda(\theta) = \text{const}$ .

Тому доцільно їх комплексний спектр представити у тривимірній формі:

$$S(jf, if, \lambda) = S(f, \lambda) \cdot e^{j\varphi(f)} \cdot e^{i\lambda(\theta)}. \tag{5}$$

Рівняння (6) враховує те, що просторові параметри  $\lambda(\theta)$  можна представити як просторову фазу радіосигналу і ввести як складову частину узагальненого тривимірного фазочастотного спектра  $\varphi_\Sigma(f)$ :

$$\varphi_\Sigma(f) = j\varphi(f) + i\lambda(\theta), \tag{6}$$

де  $i$  – комплексна уявна змінна з модулем, що дорівнює одиниці, але описує комплексно-уявну площину, що є нормальною до комплексно-уявної площини змінної  $j$ .

Обидві складові узагальненого фазочастотного спектра  $\varphi_{\Sigma}(f)$  відповідають одному і тому ж амплітудно-частотному спектру  $S(f)$  радіосигналу, вони формуються одночасно і статистично незалежно. Тому для усунення апріорної статистичної невизначеності часового фазочастотного спектра  $\varphi(f)$  доцільно при вирішенні задачі аналізу ширини спектра радіосигналу використовувати його апріорі відомий просторовий фазочастотний спектр  $\varphi_{\theta}(f) = \lambda(\theta)$ .

В частотній області визначення ширина спектра  $\Delta f_0$  радіосигналу є його еквівалентною тривалістю і тому представляє собою енергетичний параметр [9]. В цьому випадку доцільно визначити частотний функціонал правдоподібності  $F(\Delta f)$  або його логарифм  $\ln\{F(\Delta f)\} = q(\Delta f)$ .

В якості максимально правдоподібної оцінки приймаємо значення ширини спектра  $\widehat{\Delta f}$ , що забезпечує максимум обвідної логарифма функціонала відношення правдоподібності:

$$\widehat{\Delta f} = \max \left\{ \frac{2}{N} \int_{f_H}^{f_B} \operatorname{Re} \left\{ K(jf) - \frac{1}{2} S^2(jf, \Delta f) \right\} df \right\}, \quad (7)$$

де  $K(jf)$  – квадратурна спектрально-просторова функція кореляції;

$S^2(jf, \Delta f)$  – регульований по ширині спектра  $\Delta f$  спектр потужності корисного сигналу.

Рівняння (7) визначає алгоритм оцінки ширини спектра  $\Delta f_0$ , базовою операцією якого є квадратурна спектрально-просторова функція кореляції:

$$K(jf) = \left[ \int_{f_H}^{f_B} \operatorname{Re}^2 \{ U(jf, \theta) \cdot S(f, \Delta f) \} df + \int_{f_H}^{f_B} \operatorname{Im}^2 \{ U(jf, \theta) \cdot S(f, \Delta f) \} df \right]^{1/2}, \quad (8)$$

де  $\Delta f$  – очікуване значення ширини спектра;

$\theta(f)$  – вимірне значення напрямку на джерело;

$U(jf, \theta) = U(f) \cdot \exp(j\theta(f))$  – вимірня спектрально-просторова реалізація прийнятої суміші  $U(t)$ .

Визначимо дисперсію оцінки ширини спектра радіосигналу  $D \cdot \Delta f$ . Для цього логарифм функціонала правдоподібності (7) представимо у вигляді:

$$q(\Delta f) = q_S(\Delta f) + q_n(\Delta f), \quad (9)$$

де:  $q_S(\Delta f) = \frac{2}{N} \int_{f_H}^{f_B} \operatorname{Re} \left\{ S(jf, \theta_0, \Delta f_0) \cdot S^*(jf, \theta_0, \Delta f) - \frac{1}{2} S^2(jf, \theta_0, \Delta f) \right\} df$  – сигнальна функція;

$q_n(\Delta f) = \frac{2}{N} \int_{f_H}^{f_B} \operatorname{Re} \{ n(jf, \theta) \cdot S^*(jf, \theta_0, \Delta f) \} df$  – шумова функція.

В свою чергу сигнальна функція  $q_S(\Delta f)$  дорівнює [9]:

$$q_S(\Delta f) = \frac{S_0^2}{N} \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta f \cdot \Delta f_0}{\sqrt{\Delta f^2 + \Delta f_0^2}} - \frac{\Delta f}{2} \right), \quad (10)$$

В результаті шукана дисперсія  $D \cdot \Delta f$  дорівнює [4, 9, 10]:

$$D \cdot \Delta f = -1 / \left[ \frac{d^2 q_S(\Delta f)}{d\Delta f^2} \right] |_{\Delta f_0} = \frac{2N \cdot \Delta f_0^2}{3E}, \quad (11)$$

де  $E = \frac{1}{2} S_0^2 \cdot \Delta f_0$  – енергія корисного сигналу.

Також відносна дисперсія оцінки ширини спектра радіосигналу з гаусовим енергетичним спектром дорівнює:

$$D \cdot \Delta f / \Delta f_0^2 = (4 / 3)(2E / N)^{-1}. \quad (12)$$

Аналіз рівняння (12) показує, що відносна дисперсія ширини спектра обернено пропорційна відношенню сигнал/шум  $2E / N$  і визначається повною накопиченою енергією корисного сигналу, що забезпечує високу завадостійкість, особливо при аналізі широкосмугових радіовипромінювань.

Порівняльний аналіз виразів (10) та (11) з аналогічними характеристиками аналізу ширини спектра в частотній та часовій областях для випадку апіорі відомого сигналу [4, 9, 10, 11] показує, що якість аналізу запропонованого алгоритму не гірша.

Можна показати також, що отримані частотно-просторові кореляційні характеристики співпадають із нижніми границями, які визначаються нерівністю Рао-Крамера [4, 9].

Таким чином, поставлена в статті задача вирішена.

**Висновки.** Задачу аналізу ширини спектра радіосигналу з невідомим фазовим спектром та невідомими координатами його джерела при наявності адитивного нормального шуму можливо оптимально вирішити, використовуючи аналіз прийнятої реалізації в частотно-просторовій області визначення без зниження достовірності. Основною операцією такого аналізу є визначення квадратурної частотно-просторової кореляційної функції. При цьому кількісні імовірнісні характеристики операції аналізу ширини спектра в частотно-просторовій області співпадають з відомими значеннями характеристик операції аналізу в частотній або часовій областях для випадку апіорі повністю відомого сигналу.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ступак В.С., Долматов С.О.* Основи радіочастотного контролю: Практичний посібник / За ред. В.Ф. Олійника. – Київ, 2004 – 231 с.
2. *Егоров Е.И., Павлюк А.П.* Новый этап в нормировании и контроле ширины полосы частот и внеполосных излучений радиопередатчиков // Электросвязь. – 2003. – № 3.
3. *Маковеева М.М., Шинаков Ю.С.* Системы связи с подвижными объектами: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
4. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. – Изд. 2-е., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
5. *Слободянюк П.В., Благодарный В.Г., Ступак В.С.* Довідник з радіомоніторингу / За ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин: ТОВ Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.
6. *Радзиевский В.Г., Уфаев В.А.* Первичная обработка сигналов в цифровых панорамных обнаружителях – пеленгаторах. – М.: Радиотехника, 2003. – № 7.
7. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
8. *Радзиевский В.Г., Сирота А.А.* Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. – М.: ИПРЖР, 2001. – 574 с.
9. *Тихонов В.И.* Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
10. *Трифонов А.П., Шинаков Ю.С.* Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
11. *Ципоренко В.Г.* Аналіз ширини спектра радіосигналу з невідомим фазовим спектром // Вісник ЖДТУ. – 2009. – № 1 (48) / Технічні науки. – С. 127–130.

ЦИПОРЕНКО Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрової обробки сигналів.

Подано 05.11.2009

**В.Г. Ципоренко.** Просторово-спектральний аналіз ширини спектра радіовипромінювань

**В.Г. Ципоренко.** Пространственно-спектральный анализ ширины спектра радиоизлучений

**V.G. Tsiporenko.** Spatially-spectral analysis of width of spectrum of radio radiations

УДК 621.37:621.391

**Пространственно-спектральный анализ ширины спектра радиоизлучений / В.Г. Ципоренко.**

Показано, что оптимальный анализ ширины спектра радиосигналов с неизвестным фазовым спектром при наличии адитивного шума источников радиоизлучения с неизвестными координатами может быть реализован в частотно-пространственной области определения. Основной операцией такого анализа является определение квадратурной частотно-пространственной корреляционной функции. Определены количественные характеристики операции анализа ширины спектра в частотно-пространственной области.

УДК 621.37:621.391

**Spatially-spectral analysis of width of spectrum of radio radiations / V.G. Tsiporenko.**

It is rotined that the optimum analysis of width of spectrum of radio signals with an unknown phase spectrum at presence of additive noise of sources of radio radiation with unknown co-ordinates can be realized in the frequency-spatial range of definition. The basic operation of such analysis is determination of quadrature frequency-spatial correlation function. Quantitative descriptions of operation of analysis of spectrum width are certain in a frequency spatial area.