INFORMATION TECHNOLOGY

DOI 10.20535/2411-1031.2023.11.1.279857
УДК 621.618:519.686

СЕРГІЙ ШОЛОХОВ,
ІВАН САМБОРСЬКИЙ,
БОГДАН НІКОЛАЄНКО,
ЄВГЕН САМБОРСЬКИЙ

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СКРИТНОСТІ РАДІОЗАСОБІВ ВІДОМЧОГО ЗВ'ЯЗКУ З ПРОГРАМНОЮ ПЕРЕБУДОВОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ

Спроможність сучасних систем відомчого зв'язку виконувати завдання в умовах ведення противником радіоелектронного подавлення характеризує їх завадозахищеність. Відомо, що завадозахищеність радіозасобів в умовах ведення противником радіоелектронної розвідки та радіоелектронного подавлення може бути описана сукупністю ймовірнісних показників, які характеризують її скритність (енергетичну) та завадостійкість. При цьому, скритність (енергетична) – це спроможність систем відомчого зв'язку протидіяти засобам радіоелектронної розвідки противника, що спрямовані на виявлення факту роботи СВЗ, визначення параметрів її радіовипромінювань, перехоплення інформації для подальшої постановки навмисних радіоелектронних та електромагнітних завад. Одним з методів, що дозволяє суттєво підвищити скритність систем відомчого зв'язку є застосування сигналів із програмною перебудовою робочої частоти. Дані сигнали являють собою сукупність радіоімпульсів (елементів сигналу), несучі частоти яких змінюються у часі за законом псевдовипадкової послідовності. Противник у широкій смузі частот здійснює пошук та виявлення елементів зазначених сигналів. Даний пошук здійснюється в умовах часткової апріорної невизначеності відносно їх спектрально-годинної структури за допомогою панорамних приймальних пристроїв. Варто зауважити, що основою засобів радіорозвідки провідних держав світу є Фур'є-процесори, які виконують перетворення Фур'є від реалізації сукупності вихідних сигналів. При проектуванні та розробці методів завадозахисту виникає задача оцінки їх енергетичної скритності. Відомі результати досліджень та існуючі методики дозволяють спрощено оцінити енергетичну скритність радіозасобів із програмною перебудовою робочої частоти в умовах обмежень часу на прийняття рішення та не враховують особливості побудови новітніх засобів панорамного аналізу. Зокрема, у відомих методиках не враховані особливості процесу частотно-часового пошуку елементів зазначених сигналів у широкій смузі частот панорамними приймальними пристроями на основі комплексного застосування різних типів Фур'є-процесорів, порядок спектрально-часової обробки елементів сигналів на виході Фур'є-процесорів, вимоги до їх порогової чутливості та динамічного діапазону сигналу. Тому, у статті запропонована методика оцінки прихованості систем відомчого зв'язку з програмною перебудовою робочої частоти для визначення показників завадозахищеності на основі Фур'є-процесорів в умовах застосування противником сучасних засобів радіоелектронної розвідки.

Ключові слова: радіозасіб, радіоподавлення, радіорозвідка, завадозахищеність, програмна перебудова робочої частоти, енергетична скритність, Фур'є-процесор.

Постановка проблеми. У сучасних радіоелектронних конфліктах високої інтенсивності противник може активно застосовувати проти сучасних систем відомчого зв'язку (СВЗ) засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) та радіоелектронної розвідки(РЕР) [1], [2]. У таких умовах

суттєво зростає роль показників, що всебічно визначають можливість виконання завдання за призначенням в умовах активного ведення противником радіоелектронного подавлення (РЕП) радіозасобів СВЗ. При цьому можуть застосовуватись навмисні радіоелектронні та електромагнітні завади [1], [2].

Спроможність радіозасобів СВЗ виконувати завдання в умовах ведення противником РЕП характеризує їх завадозахищеність. Відомо, що завадозахищеність радіозасобів в умовах ведення противником радіорозвідки та РЕП може бути описана сукупністю ймовірнісних показників, що характеризують її скритність та завадостійкість [1] - [9].

Одним із методів, що дозволяє суттєво підвищити скритність СВЗ є застосування сигналів з програмною перебудовою робочої частоти (ППРЧ). Засоби з ППРЧ характеризуються значно підвищеною енергетичною скритністю та завадостійкістю [10] - [13].

При проектуванні та розробці методів завадозахисту СВЗ з ППРЧ виникає задача оцінки їх енергетичної скритності [2] - [4] та [10] - [14].

Основою новітніх засобів РЕР засобів радіозв'язку СВЗ з ППРЧ є панорамні приймальні пристрої (ППрП) на основі комплексування різних типів Фур'є-процесорів (ФП), що виконують перетворення Фур'є від реалізації сукупності вихідних сигналів [13].

Відомі методики оцінки енергетичної скритності радіозасобів СВЗ з ППРЧ не враховують особливості частотно-часового пошуку елементів сигналів із поширенням спектру, неповною мірою враховують особливості ведення противником радіорозвідки із застосуванням ППрП на основі комплексного застосування різних типів ФП та не враховує особливості обробки сигналів на їх виході. Це призводить до невідповідності розрахункових показників енергетичної скритності щодо результатів експериментальної оцінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оцінки завадозахищеності та її складових, скритності та завадостійкості, розглянуті та узагальнені у багатьох джерелах, наприклад [2] - [7]. Підходи до визначення енергетичної скритності описані, наприклад в [2] - [11]. Питання завадозахищеності систем зв'язку з використанням сигналів ППРЧ, розглянуті в [12] - [14]. Питання побудови панорамних приймальних пристроїв для пошуку (виявлення) сигналів у широкій смузі частот із застосуванням ФП для подальшого їх аналізу розглянуті в [14].

Однак відомі методики дозволяють спрощено оцінити енергетичну скритність засобів СВЗ з ППРЧ в умовах обмежень часу на прийняття рішення та не враховують особливості побудови новітніх засобів панорамного аналізу. Зокрема, у існуючих методиках не враховані особливості процесу частотно-часового пошуку елементів сигналів ППРЧ у широкій смузі частот у панорамних приймальних пристроях на основі комплексного застосування різних типів ФП, порядок спектрально-часової обробки елементів сигналів з ППРЧ на виході ФП, вимоги до їх порогової чутливості та динамічного діапазону [10] - [14].

Метою статті є вдосконалення методики оцінки енергетичної скритності радіозасобів СВЗ із ППРЧ при оцінці їх завадозахищеності в умовах ведення противником РЕР з використанням новітніх засобів радіорозвідки на основі комплексного застосування різних типів ФП.

Методика повинна враховувати особливості процесу частотно-часового пошуку елементів сигналів ППРЧ у широкій смузі частот у ППрП на основі комплексного застосування різних типів ФП, порядок спектрально-часової обробки елементів сигналів із ППРЧ на виході ФП, вимоги до їх порогової чутливості та динамічного діапазону.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нехай у розгляд введена ймовірність P_p радіорозвідки параметрів радіозасобу СВЗ, що необхідні для організації його РЕП, а P_n – ймовірність помилки (середня ймовірність помилки) при прийомі сигналу радіозасобами СВЗ в умовах дії радіоелектронних завад комплексів РЕБ противника.

Тоді показник завадозахищеності радіозасобу СВЗ може бути визначений у вигляді ймовірності $P_{\text{звз}}$, а саме:

$$P_{\text{звз}} = 1 - P_p \cdot P_n. \quad (1)$$

Введемо ймовірність $P_{\text{скр}}$, яку доцільно розглядати як показник енергетичної скритності радіозасобу СВЗ в умовах ведення його противником радіорозвідки.

$$P_{\text{скр}} = 1 - P_{\text{р}}. \quad (2)$$

Деталізуємо порядок визначення ймовірності P_p в (2).

Для противника пошук (виявлення) у широкій смузі частот елементів сигналів з ППРЧ у новітніх засобах радіорозвідки здійснюється в умовах часткової апріорної невизначеності відносно їх спектрально-годинної структури за допомогою ППрП на основі ФП [13], [14].

Для оцінки прихованості СВЗ з ППРЧ за (1) та (2) необхідно розробити методику оцінки ймовірності P_p радіозасобів СВЗ з ППРЧ. Для цього введемо та всебічно розглянемо логічне висловлювання $P_{\text{рлог}}$ як сукупність критеріїв, що характеризує не вирішення завдань із радіорозвідки радіозасобу СВЗ з ППРЧ окремим засобом РЕР противника.

Зрозуміло, що практичне застосування методики буде мати бінарний результат:

$$P_{\text{рлог}} = \left\{ P^{\text{рз}}_{\text{ччз}} \geq P^{\text{потр}}_{\text{ччз}} \wedge P_{\text{свх}} \left(K_{\text{ослвп}}, K_{\text{огм}}, K_{\text{онп}}, K_{\text{ндн}}, \varepsilon_K \right) \geq P^{\partial}_{\text{поррп}} \wedge DD_{\text{С}} \leq DD^{\partial}_{\text{рп}} \right\}, \quad (3)$$

$$P_p = \begin{Bmatrix} 1 \text{ при } P_{\text{рлог}} = \text{істина;} \\ 0 \text{ при } P_{\text{рлог}} \neq \text{істина.} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

де $P^{\text{рз}}_{\text{ччз}}, P^{\text{потр}}_{\text{ччз}}$ – ймовірність частотно-годинного збігу елементів сигналу з ППРЧ і вибірок ФП та її необхідний рівень у засобі радіорозвідки противника відповідно;

$K_{\text{ослвп}}, K_{\text{огм}}, K_{\text{онп}}, K_{\text{ндн}}$ – коефіцієнти послаблення сигналу у вільному просторі, гідрометеорах, поляризаційні та за рахунок незбігу діаграм спрямованості антен засобів РЕР та РЕЗ з ППРЧ відповідно;

ε_{κ} – коефіцієнт врахування неузгодженості приймального тракту ФП та сигналу, що приймається засобом радіорозвідки;

$p_{\text{свх}}$ – потужність сигналу засобу з ППРЧ на вході приймача станції радіорозвідки;

$P^{\partial}_{\text{поррп}}$ – порогова чутливість розвідприймача противника, що потенційно може бути досягнена з використанням новітніх технологій обробки сигналів;

$DD_C, DD^{\partial}_{\text{рп}}$ – динамічний діапазон засобів обробки сигналів та діапазон, що може бути досягнутий у засобах радіорозвідки, відповідно.

Конкретизуємо підходи щодо обґрунтування та оцінки параметрів, що входять у вираз (3).

Нехай пошук (виявлення) елементів сигналу з ППРЧ здійснюється ППрП на основі ФП (або їх сукупністю), що має $r_{\text{к}} = \Delta \text{F}_a / \delta_f$ еквівалентних каналів частотного розподілення (ЕКЧР), де $\Delta F_a, \delta_f$ – смуга аналізованих частот та розрізнювальна здатність за частотою ФП відповідно.

Еквівалентні канали частотного розподілення ФП характеризуються відповідно комплексними спектральними ваговими функціями (СВФ) $FW_i(j\varpi) = FW_i(\omega)\exp\{j\phi_{ki}(\varpi)\}$ з центральними частотами ϖ_{ki}, смугами пропускання $\delta_{f\,ki} = \delta_k$ та початковими фазами ϕ_{ki}, де $i = 1...m,\ m$ – кількість ЕКЧР ФП. Час накопичення сигналу $\tau_н$ у ЕКЧР дорівнює тривалості $\tau_в$ реалізації, що обробляється. Виявлення елементів сигналів із ППРЧ здійснюється на виході $n(n \leq m)$, у загальному випадку неузгоджених з елементом сигналу статистично незалежних ЕКЧР ФП на фоні білого гаусівського шуму зі спектральною щільністю потужності $W(\varpi) = W_0 = \text{const}$. Діапазон ΔF_a не менше смуги частот $\Delta \text{F}_{\text{ппрч}}$, що використовується у режимі ППРЧ. Час аналізу частотного діапазону ΔF_a ФП дорівнює:

$$\tau_a = \frac{\Delta Fa}{Ya} = r_k \cdot \tau_{опр}, \tag{5}$$

де $\gamma_a, \tau_{\text{опр}}$ – швидкість аналізу ФП та час опитування ЕКЧР відповідно.

На вхід розвідприймача надходять елементи сигналу з ППРЧ $s(t)$ з тривалістю τ_e, шириною спектра Δf_e, несівною частотою ϖ_e, початковою фазою ϕ_e та комплексною спектральною щільністю $S(j\varpi) = S(\omega)\exp\{j\phi_e(\varpi)\}$ і періодом появи T_e.

Якість пошуку (виявлення) елементів сигналів з ППРЧ охарактеризуємо ймовірністю частотно-годинного збігу $p_{\text{ччз}}(t_{\text{н}})$, де $t_{\text{н}}$ – відрізок часу, визначений для вирішення задачі спостереження за радіозасобами СВЗ. При цьому $p_{\text{ччз}}(t_{\text{н}})$ – ймовірність того, що для кожного з $\xi = 1...ent\{t_{\text{н}}/T_e\}$ елементів, що надійшли у смугу ΔF_a аналізу ФП за відрізок часу $t_{\text{н}}$, на інтервалі τ відбудеться збіг спектральних складових елемента сигналу з ППРЧ та частоти налагодження ЕКЧР ФП під час реєстрації його стану [14].

Враховуючи результати [13], при оцінці енергетичної скритності радіозасобів СВЗ з ППРЧ ймовірність $p_{\text{ччз}}(t_{\text{н}})$ визначимо у такому вигляді:

$$P_{\text{ччз}}(t_{\text{н}}) \geq \begin{cases} \left\{\left\langle 1-\left[1-\dfrac{(\tau_{\text{опр}}+\tau_{\text{е}}+2\tau_{\min})\tau_{\text{опр}}}{\tau_A^{\,2}}\right]^{r_k}\right\rangle^{\vartheta}\right\}^{\xi} & \text{при} \quad \begin{cases} \tau_a \leq T_e \\ \tau_{\min}\{\tau_e, \tau_{\text{опр}}\}_{\min} \\ \tau_{\text{опр}} \leq T_e - \tau_e \end{cases} \\ \left\{\left\langle 1-\left[1-\dfrac{(\tau_{\text{опр}}+\tau_{\text{е}}+2\tau_{\min})\tau_{\text{опр}}}{\tau_A \cdot T_{\text{е}}}\right]^{r_k}\right\rangle^{\vartheta}\right\}^{\xi} & \text{при} \quad \begin{cases} \tau_a > T_e \\ \tau_{\min} \leq \{\tau_e, \tau_{\text{опр}}\}_{\min} \\ \tau_{\text{опр}} \leq T_e - \tau_e \end{cases} \\ \left\{\left\langle 1-\left[1-\dfrac{(\tau_{\text{опр}}+\tau_{\text{е}}+2\tau_{\min})\tau_{\text{опр}}}{\tau_A \cdot (\tau_{\text{е}}+\tau_{\text{опр}})}\right]^{r_k}\right\rangle^{\vartheta}\right\}^{\xi} & \text{при} \quad \begin{cases} \tau_{\min} \leq \{\tau_e, \tau_{\text{опр}}\}_{\min} \\ \tau_{\text{оп}} > T_e - \tau_e \end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

де $\vartheta = \begin{cases} \text{ent}(\tau_a / T_e) \text{ при } \tau_a \geq T_e \\ 1 \quad \text{при } \tau_a < T \end{cases}$.

Практичне застосування моделі (6) вимагає уточнення параметрів $\tau_{\text{а}}$ та $\tau_{\text{опр}}$ до конкретного виду ФП у такому порядку:

– якщо засіб РЕР реалізований на основі послідовного фільтрового ФП (ПФФП), то $\tau_{\text{а}} = \Delta F_{\text{а}} / \gamma_{\text{пч}}$, а $\tau_{\text{опр}} = \Delta F_{\text{а}} / (\gamma_{\text{пч}} \cdot r_k)$, де $\gamma_{\text{пч}}$ – час перестроювання за частотою ПФФП;

– якщо засіб радіорозвідки побудований на основі ПФФП з паралельним опитуванням k ЕКЧР, то $\tau_{\text{а}} = F_{\text{а}} / (\gamma_{\text{пч}} \cdot k)$;

– при аналізі акустооптичного з просторовим інтегруванням (АОФП) та багатоканального фільтрового ФП (БФФП) $\tau_{\text{а}}$ у формулі (6) слід вибирати рівним часу опитування лінійки фотодіодів АОФП та частотних каналів БФФП відповідно.

Для виявлення сигналу на виході розвідприймача з потрібними показниками якості необхідно, щоб витримувалась вимога електромагнітної досяжності радіоелектронних засобів

$$\frac{P_{свх}}{\varepsilon_K} \geq P^{\partial}_{\text{поррп}}. \tag{7}$$

Порогова чутливість ППрП засобу радіорозвідки противника визначається за наступною формулою:

$$P^{\partial}_{\text{поррп}} = k \cdot T_o \cdot q^2_{\text{пор}} \cdot \Delta f_{\text{еф}} \cdot \left(t_{\text{а}} - 1 + \frac{N}{K_{\text{пф}}} \right), \tag{8}$$

де k – стала Больцмана;

T_o – стандартна температура;

$\Delta f_{\text{еф}}$ – ефективна шумова смуга приймача;

t_a – відносна шумова температура антени;

N – коефіцієнт шуму приймача;

$K_{\text{пф}}$ – коефіцієнт передачі фідерного тракту;

$q^2_{\text{пор}}$ – потрібне відношення потужності корисного сигналу до потужності завади на виході лінійної частини розвідприймача противника;

$\varepsilon_к$ – коефіцієнт, що враховує втрати потужності елемента сигналу з ППРЧ за рахунок апріорного неузгодження спектральної годинної функції еквівалентного каналу частотного розподілення (ЕКЧР) ФП та сигналу [13]

$$\varepsilon_{ki} = \int_{-\infty}^{\infty} \left| FW\left(\omega - \omega_{ki}\right) \right|^2 d\omega \int_{-\infty}^{\infty} \left| S\left(\omega - \omega_c\right) \right|^4 d\omega \times$$

$$\times \left[\left| \int_{-\infty}^{\infty} S\left(\omega - \omega_c\right) FW\left(\omega - \omega_{ki}\right) \exp\left\{ j\left(\phi_c\left(\omega\right) + \phi_{ki}\left(\omega\right) + \omega\tau_{в}\right)\right\} d\omega \right|^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left| S\left(\omega - \omega_c\right) \right|^2 d\omega \right]^{-1}, \tag{9}$$

де $FW\left(\varpi - \varpi_{ki}\right)$ – спектральна вагова функція еквівалентного каналу частотного розподілення розвідприймача;

$S\left(\varpi - \varpi_c\right)$ – спектральна щільність сигналу, що надійшов на вхід розвідприймача.

На практиці при оцінці енергетичної скритності радіозасобів СВЗ з ППРЧ коефіцієнт $\varepsilon_к$ набуває різних для кожного *i*-го еквівалентного каналу частотного поділу (ЕКЧП) ФП значень $\varepsilon_{\text{к}}$, $i = 1...m.$ Це обумовлено миттєвим взаємним розташуванням еквівалентних каналів частотного розподілення ФП та спектра сигналу, що виявляється на осі частот.

При розрахунках енергетичної скритності радіозасобів СВЗ з ППРЧ необхідно орієнтуватися на найменш вигідний, з погляду виявлення, варіант взаємного розташування ЕКЧР ФП та сигналу на осі частот. При цьому величину коефіцієнта ε_k для умови (4) необхідно вибирати рівною максимальному можливому значенню ε_k

$$\varepsilon_{\text{к}} = \max\left\{\varepsilon_{ki}\right\}, i = 1...m. \tag{10}$$

При застосуванні виразів (7), (9)-(10) для оцінки виконання виразу (3)-(4) необхідно враховувати особливості обробки сигналу в ФП, вибираючи варіанти взаємного перекриття СВФ ЕКЧР та спектральної щільності корисного сигналу.

Розглянемо можливі варіанти.

1. Якщо обробка сигналу проводиться у розвідприймачі на основі ФП, що дискретизує сигнал за частотою (наприклад, багатоканальний фільтровий ФП), то визначати $\varepsilon_{\text{к}}$ доцільно

для ситуації, за якої центральна частота елемента сигналу з ППРЧ попадає на перетин СЧФ суміжних ЕКЧР.

2. При розгляді розвідприймачів (РП), сигнал на виході яких не має дискретного характеру (наприклад, дисперсійний або акустооптичний із часовим інтегруванням ФП), та коли $\frac{\Delta f_e}{\delta f} \geq 1$, необхідно розраховувати ε_k для випадку, при якому ЕКЧР квазіузгоджений із сигналом, що приймається за центральною частотою. Це обумовлено особливостями перетворення сигналу в пристроях на основі алгоритмів лінійної частотної модуляції.

3. У разі, коли для РП, що вказаний у попередньому пункті, $\frac{\Delta f_e}{\delta f} < 1$, необхідно орієнтуватись на ситуацію, при якій центральна частота сигналу збігається з центральною частотою одного з ЕКЧР ФП.

У табл. 1 наведені результати застосування виразів (9)-(10) для визначення коефіцієнта ε_k при оцінці енергетичної скритності радіозасобів СВЗ з ППРЧ розвідприймачем на основі багатоканального фільтрового ФП. Результати отримані для типових СВФ ЕКЧР ФП. При розрахунках величина співвідношення $\frac{\Delta f_e}{\delta f}$ складала відповідно 1…8, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8. Моделлю (еталоном) вхідного сигналу був обраний дзвоникоподібний (гаусовий) імпульс.

Таблиця 1 – Величина коефіцієнта $\varepsilon_к$

СВФ ФП	Величина коефіцієнта $\Delta f_e / \delta f$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	1/2	1/4	1/6	1/8
Діріхле	33,1	1,35	1,99	7,2	77,2	20,6	108,5	39,1	12,1	104,5	487,7	$2 \cdot 10^3$
Бартлетта	27,9	1,8	61,2	8,3	78,6	19,6	97,8	33,9	302,8	$6 \cdot 10^3$	10^7	$6 \cdot 10^4$
Парзена	93,4	3,03	40,5	6,7	52,4	13,8	66,5	23,8	21,1	17,7	22,1	27,4
Хеннінга	11,3	1,3	13,9	8,02	83,1	21,8	114,4	40,8	3,7	18,2	189,1	557,1
Хеммінга	12,4	1,4	14,7	7,8	81,8	21,5	113	40,4	3,9	18,6	185,9	550,3

Вираз для розрахунку рівня сигналу радіозасобу СВЗ $P_{\text{свх}}$ на вході РП матиме вигляд:

$$P_{\text{свх}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot F_{\text{ст}}^{\ 2}(a_{\text{ст}}, \theta_{\text{ст}}) \cdot F_{\text{ср}}^{\ 2}(a_{\text{ср}}, \theta_{\text{ср}})}{K_{\text{ослп}}, K_{\text{огм}}, K_{\text{онп}}}, \quad (11)$$

де $F_{\text{ст}}^{\ 2}\left(a_{\text{ст}}, \theta_{\text{ст}}\right), F_{\text{ср}}^{\ 2}\left(a_{\text{ср}}, \theta_{\text{ср}}\right)$ – нормовані діаграми спрямованості антен засобу з ППРЧ та радіорозвідки відповідно;

$P_{\text{пер}}, G_{\text{пер}}, G_{\text{пр}}$ – потужність, коефіцієнт підсилення антен передавача та розвідприймача відповідно;

$K_{\text{ослвп}}, K_{\text{огм}}, K_{\text{онп}}$ – коефіцієнти, що враховують втрати потужності сигналу при розповсюдженні у вільному просторі, гідрометеорах та за рахунок незбігу поляризації відповідно.

Обґрунтування вимог до параметра DD_c з врахуванням (3) труднощів не викликає та може базуватися на методиці (6). Акцентуємо увагу на визначенні параметра $DD_{\text{рп}}^{\partial}$.

При обґрунтуванні параметра $DD_{\text{рп}}^{\partial}$ поряд із класичним визначенням необхідно застосовувати поняття динамічного діапазону у режимі виявлення сигналів за рівнем бокових пелюсток спектральних вагомих функцій (СВФ) з урахуванням взаємного впливу сигналів, що спостерігаються на вході ФП [7].

Нехай у РП, який розглядається, використовуються такі вхідні ланцюги, що завідомо динамічний діапазон за рівнем бокових пелюсток СВФ менший ніж динамічний діапазон, що оцінюється на основі (6). Тоді динамічний діапазон розвідприймача за рівнем бокових пелюсток СВФ повністю визначається особливостями обробки сигналів у ФП. Припустимо, що на вхід ФП надходять два перевірочних гармонічних сигнали $U_{1,2}(t)=U_{1,2}\cdot\cos(\varpi_{1,2}t+\phi_{1,2})$ з амплітудами $U_{1,2}$ та початковими фазами $\phi_{1,2}$. Частоти гармонік $f_{1,2}=\frac{\omega_{1,2}}{2\cdot\pi}$ знаходяться у смузі аналізу процесора.

Сигнал на виході лінійної частини тракту ФП в області позитивних частот з точністю до постійного амплітудного множника визначимо у вигляді:

$$s(\omega)=U_1\cdot\tau_{\text{В}}\cdot FW(\omega-\omega_1)\cdot e^{j\phi 1}+U_2\cdot\tau_{\text{В}}\cdot FW(\omega-\omega_1)\cdot e^{j\phi 2}, \quad (12)$$

де $\tau_{\text{в}}$ – тривалість вибірки сигналів у ФП;

$FW(\Omega)$ – дійсна, симетрична відносно $\Omega=0$, нормована спектральна вагова функція ФП.

Огинаюча відклику ФП $|s(\omega)|$ на вхідний бігармонійний сигнал залежить від різниці фаз вхідних гармонік $\Delta\phi=\phi_2-\phi_1$, та розраховується за виразом:

$$|s(\omega)|=\tau_{\text{В}}\cdot\sqrt{\left(U_1^2\cdot FW(\omega-\omega_1)+U_2^2\cdot FW(\omega-\omega_2)+2U_1U_2\cdot FW(\omega-\omega_1)\cdot FW(\omega-\omega_2)\cdot\cos\Delta\phi\right)}. \quad (13)$$

Відмітимо, що визначення динамічного діапазону за рівнем бокових пелюсток СЧФ ФП та методика його оцінки повинні враховувати особливості обробки сигналів на виході ФП.

Врахувати особливості обробки сигналів можливо, визначаючи величину динамічного діапазону при фіксованих $\Delta\phi$, а саме:

1. Якщо спектрограми на виході ФП обробляються спецпроцесором із розділенням сигналів у першій з тих, що надійшли з виходу ФП спектрограм (повне розділення), то при оцінці динамічного діапазону розвідприймача доцільно орієнтуватися на гіршу ситуацію та визначати його при $\Delta\phi=\arccos\left\{\text{sgn}\left[FW_m(\Delta\omega)\right]\right\}$.

2. При автоматизованій обробці сукупності спектрограм з аналізом змін $s(\omega)$, якщо достатньо роздільне спостереження сигналів хоча б в одній з спектрограм (граничне розділення), необхідно обирати $\Delta\phi=\arccos\left\{\text{sgn}\left[FW_m(\Delta\omega)\right]\right\}$.

3. Якщо амплітуди сигналів усереднюються на однакових частотах у декількох спектрограмах, або необхідно візуальне розділення сигналів у сукупності спектрограм на екрані індикатора (інтегральне розділення), то при оцінці динамічного діапазону доцільно задавати $\Delta\phi=\pi/2$.

Після вибору $\Delta\phi$ динамічний діапазон розвідприймача за рівнем бокових пелюсток СЧФ $D^{\text{Д}}_{\text{рп}}$ може бути знайдений експериментально, або обчислений шляхом порівняння рівнів сигналу на виході ФП на частотах $\omega-\omega_2$ та $\omega=\omega_1-\Delta\omega$ згідно з визначенням:

$$D^{\text{Д}}_{\text{рп}}=U_1\left\langle\arg_{U_2}\left\{\begin{matrix}\text{mod}\left[s\left(\omega=\omega_2,\Delta\phi=\Delta\phi^0\right)\right]\\ -\text{mod}\left[s\left(\omega=\omega_1-\Delta\omega,\Delta\phi=\Delta\phi^0\right)\right]\le\Delta_i\end{matrix}\right\}\right\rangle^{-1}, \quad (14)$$

де Δ_i – абсолютна інструментальна похибка вимірювання різниці амплітуд сигналу на виході ФП у точках $\omega-\omega_2$ та $\omega=\omega_1-\Delta\omega$ може бути визначена у вигляді $\Delta i=\delta\tau_{\text{В}}U_1\,\text{mod}\left\{FW(\Delta\omega)\right\}$ при $\delta<1$:

$$\mathrm{mod}\left[S\left(\omega=\omega_2,\Delta\phi=\Delta\phi^0\right)\right]=\tau_B\cdot\sqrt{U_2^2+U_1FW^2\left(\Delta\omega\right)+2U_1U_2\cdot FW_m\left(\Delta\omega\right)\cos\Delta\phi} \quad (15)$$

та

$$\mathrm{mod}\left[s(\omega=\omega_1-\Delta\omega,\Delta\phi=\Delta\phi^0)\right]=\tau_{\mathrm{B}}\times$$

$$\times\sqrt{U_1^2FW_m^2(\Delta\omega)+U_2^2FW^2(2\Delta\omega)+2U_1U_2\cdot FW_m(\Delta\omega)FW(2\Delta\omega)\cos\Delta\phi}. \quad (16)$$

У табл. 2 наведені результати розрахунків параметра $D^{\text{д}}_{\text{рп}}$ щодо типових СЧФ при $\Delta\phi=0\ \ \pi/2\ \ \pi$ та $\delta=0{,}1$.

Таблиця 2 – Результати розрахунків параметра $D^{\text{д}}_{\text{рп}}$

СЧФ	$FW\left(\frac{\Delta\omega\tau_B}{2\pi}\right)$, дБ	$D^{\text{д}}_{\text{рп}}$, дБ при $\delta=0{,}1$		
		$\Delta\phi=0$	$\Delta\phi=\pi/2$	$\Delta\phi=\pi$
Діріхле	13,26	7,22	20,03	32,86
Фейера-Бартлетта	26,52	46,51	33,30	20,10
Ханна (Хеннінга, Тьюкіна)	31,47	25,00	38,25	51,55
Хеммінга	42,68	62,79	49,52	36,28
Парзена	53,05	73,35	59,98	46,74
Блекмана	58,11	78,79	65,24	51,67
Блекмана-Херріса	90,14	83,74	97,72	110,45

Наведені у табл. 1 та 2 результати нормовані та можуть використовуватися при визначенні енергетичної прихованості та завадостійкості засобів СВЗ з ППРЧ при їх проектуванні, розробці способів застосування за призначенням, оцінці тактико-технічних характеристик та функціональних можливостей, розробці методів завадозахисту.

Висновки. Таким чином, запропонована методика дозволяє проводити оцінку енергетичної скритності радіозасобів СВЗ з ППРЧ з урахуванням особливостей процесу частотно-часового пошуку елементів сигналів ППРЧ у широкій смузі частот у ППрП на основі комплексного застосування різних типів ФП, порядок спектрально-часової обробки елементів сигналів з ППРЧ на виході ФП, вимоги до їх порогові чутливості та динамічного діапазону.

Розроблена методика може ефективно застосовуватись при оцінці завадозахищеності радіозасобів та СВЗ з ППРЧ в умовах ведення радіорозвідки противником.

У перспективах подальших досліджень планується розробити методику формалізації розглянутих показників не лише для розглянутої вище дуельної ситуації “засіб СВЗ –засіб радіорозвідки противника”, а й для випадку застосування сукупності радіозасобів СВЗ як єдиної системи передачі інформації в умовах ведення розвідки сукупністю (угрупованням) засобів РР противника в радіоелектронних конфліктах високої інтенсивності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] О. М. Черниш, С. О. Тищук, та С. М. Шолохов, “Основи формування нової ідеології ведення радіоелектронної боротьби у війнах і збройних конфліктах майбутнього”, *Наука і оборона,* № 4, с. 48-51, 2006.

[2] Е. В. Лучук, П. О. Мироненко, А. О. Попов, та О. Ю. Смольков, “Експериментальна оцінка завадозахищеності сучасних і перспективних систем зв’язку та передачі інформації”, *Військово-технічний збірник,* № 6, с. 49-55, 2012, doi: https://doi.org/10.33577/2312-4458. 6.2012.49-55.

[3] О. М. Кобяков, О. В. Д'яченко, І. Є. Бражник, та Т. О. Протасова, *Теорія сигналів та електричних кіл. Теорія сигналів: конспект лекцій.* Суми, Україна: Сумський державний університет, 2022.

[4] І. Ю. Свида, А. О. Зварич, та А. П. Волобуєв, "Метод математичного моделювання радіомаскування системи радіозв'язку військового призначення із збереженням зв'язку", *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 2, с. 141-146, 2018, [Електронний ресурс]. Доступно: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sitsbo_2018_2_24.

[5] М. О. Масесов, Л. О. Бондаренко, О. І. Садиков, та В. І. Макарчук, "Методика оцінки стійкості системи військового зв'язку", *Збірник наукових праць ВІТІ,* № 4, с. 94-102, 2016.

[6] О. В. Вакуленко, І. І. Самборський, Б. А. Ніколаєнко, та С. М. Шолохов, *Завадозахист радіоелектронних засобів. Частина 1. Основи завадозахисту спеціальних радіоелектронних засобів: навчальний посібник.* Київ, Україна: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

[7] О. С. Гаврилів, *До методу розділення змінних Фур'є: навчально-методичний посібник.* Львів, Україна: Вид. Тараса Сороки, 2009.

[8] Ю. П. Белокурський, О. Ю. Іохов, В. Є. Козлов, та О. О. Щербина, "Організація захисту каналів радіозв'язку підрозділів охорони правопорядку України". *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України,* № 1 (23), с. 46-49, 2014.

[9] М. М. Яцимірський, *Швидкі алгоритми ортогональних тригонометричних перетворень*. Львів, Україна: Академічний Експрес, 1997.

[10] Я. І. Дасюк, В. С. Ільків, П. І. Каленюк, П. П. Костробій, та З. М. Нитребич, *Функції комплексної змінної. Перетворення Фур'є та Лапласа: навчальний. посібник.* Львів, Україна: Ін-т змісту і методів навчання, 1999.

[11] R. N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*. Boston, USA: McGraw-Hill, 2000.

[12] A. S. Blok et al., "Semiconductor-laser Fourier processors of electric signals", *Kvantovaya Elektronika*, vol. 22, no. 10, pp. 997-1000, 1995.

[13] Г. В. Певцов, С. Н Шолохов, та А. З. Поточняк, "Обґрунтування величини порогової чутливості при оптимізації панорамних приймальних пристроїв на основі Фур'є-процесорів", *Радіоелектроніка*, № 3, с. 62-68, 1999.

[14] А. В. Кобзев, Г. В. Певцов, та С. М. Шолохов, "Динамічний діапазон радіотехнічних пристроїв на основі Фур'є-процесорів", *Радіоелектроніка*, № 11, с. 49-54, 1994.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2023.

REFERENCE

[1] O. M. Chernysh, S. O. Tyshchuk, and S. M. Sholokhov, "Fundamentals of forming a new ideology of electronic warfare in wars and armed conflicts of the future", *Science and Defense*, no. 4, pp. 48-51, 2006.

[2] E. V. Luchuk, P. O. Mironenko, A. O. Popov, and O. Yu. Smolkov, "Experimental evaluation of interference protection of modern and prospective communication and information transmission systems", *Military-Technical Collection*, no. 6, pp. 49-55, 2012, [Online]. Available: https://doi.org/10.33577/2312-4458.6.2012.49-55.

[3] O. M. Kobyakov, O. V. Dyachenko, I. E. Brazhnyk, and T. O. Protsanova, *Signal Theory and Electrical Circuits. Signal Theory: Lecture Notes*. Sumy, Ukraine: Sumy State University, 2022.

[4] I. Yu. Svyda, A. O. Zvarych, and A. P. Volobuyev, "Method of mathematical modeling of radio masking of a military communication system with communication preservation", *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense*, no. 2, pp. 141-146, 2018, doi: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sitsbo_2018_2_24.

[5] M. O. Masesov, L. O. Bondarenko, O. I. Sadikov, and V. I. Makarchuk, “Methodology for assessing the stability of a military communication system”, *Scientific Works of VITI*, no. 4, pp. 94-102, 2016.
[6] O. V. Vakulenko, I. I. Samborskyi, B. A. Nikolaenko, and S. M. Sholokhov, *Jamming protection of radio electronic equipment. Part 1. Fundamentals of jamming protection of special radio electronic equipment: textbook*. Kyiv, Ukraine: ISCIP Igor Sikorsky KPI, 2021
[7] O. S. Havryliv, *On the method of separation of variables in Fourier analysis: textbook*. Lviv, Ukraine: Taras Soroka Publishers, 2009.
[8] Yu. P. Belokursky, O. Yu. Iokhov, V. Ye. Kozlov, and O. O. Shcherbina, “Organization of communication channel protection for law enforcement units in Ukraine”, *Collection of scientific works of the Academy of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine*, no. 1 (23), pp. 46-49, 2014.
[9] M. M. Yatsymirsky, *Fast algorithms of orthogonal trigonometric transforms*. Lviv, Ukraine: Academic Express, 1997.
[10] Ya. I. Dasiuk, V. S. Ilkiv, P. I. Kalenyuk, P. P. Kostrobiy, and Z. M. Nytrebych, *Functions of a Complex Variable. Fourier and Laplace Transformations: a textbook*. Lviv, Ukraine: Institute of teaching content and methods, 1999.
[11] R. N. Bracewell, *The Fourier Transform and Its Applications*. Boston, USA: McGraw-Hill, 2000.
[12] A. S. Blok et al., “Semiconductor-laser Fourier processors of electric signals”, *Kvantovaya Elektronika*, vol. 22, no. 10, pp. 997-1000, 1995.
[13] H. V. Pevtsov, S. N. Sholokhov, and A. Z. Potochnyak, “Justification of the threshold sensitivity value when optimizing panoramic receivers based on Fourier processors”, *Radioelectronics*, no. 3, pp. 62-68, 1999.
[14] A. V. Kobzev, G. V. Pevtsov, and S. M. Sholokhov, “Dynamic range of radio technical devices based on Fourier processors”, *Radioelectronics*, no. 11, pp. 49-54, 1994.

SERHII SHOLOKHOV,
IVAN SAMBORSKY,
BOHDAN NIKOLAIENKO,
IEVGEN SAMBORSKYI

METHOD OF ASSESSMENT OF ENERGY INTENSITY OF PUBLIC COMMUNICATION RADIO EQUIPMENT WITH SOFTWARE ADJUSTABLE WORKING FREQUENCY FOR DETERMINATION OF INTERRUPTION PROTECTION INDICATORS

The ability of modern departmental communication systems to perform tasks in conditions of radio-electronic suppression by the enemy characterizes their immunity to interference. It is known that the interference protection of radio equipment in conditions of enemy radio reconnaissance and electronic suppression can be described by a set of probability indicators that characterize its secrecy (energy) and interference resistance. Secrecy (energy) is the ability of departmental communication systems to counteract the enemy's radio reconnaissance means, which are aimed at detecting the fact of the departmental communication system's operation, determining the parameters of its radio emissions, intercepting information for further deliberate radio-electronic and electromagnetic interference. One of the methods that significantly increases the secrecy of departmental communication systems is the use of signals with software-defined frequency conversion. These signals are a set of radio pulses (signal elements) whose frequencies change over time according to the law of pseudorandom sequence. The enemy searches for and detects the elements of these signals in a wide frequency band. This search is carried out under conditions of partial a priori uncertainty regarding their spectral-time structure using panoramic receivers. It should be noted that the basis of

the radio reconnaissance means of the world's leading states is Fourier processors, which perform Fourier transforms from the implementation of a set of input signals. When designing and developing methods for interference protection, the problem of evaluating their energy stealth arises. Known research results and existing methodologies allow for a simplified assessment of the energy stealth of radio equipment with software frequency hopping under time constraints for decision making and do not take into account the peculiarities of the construction of modern panoramic analysis tools. In particular, the known methodologies do not take into account the peculiarities of the process of frequency-time searching for elements of such signals in a wide frequency range using panoramic receiving devices based on the complex application of different types of Fourier processors, the order of spectral-time processing of signal elements at the output of Fourier processors, requirements for their threshold sensitivity and dynamic signal range. Therefore, the article proposes a methodology for evaluating the stealthiness of communication systems with software-defined frequency tuning to determine the indicators of interference protection based on Fourier processors in the conditions of the opponent's use of modern radio-electronic intelligence tools.

Keywords: radio equipment, radio suppression, radio reconnaissance, jamming resistance, software frequency tuning, energy concealment, Fourier processor.

Шолохов Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціальних телекомунікаційних систем, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0003-2222-8842, kit.docent71@gmail.com.

Самборський Іван Іванович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри спеціальних телекомунікаційних систем, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0001-5579-8740, i.i.samborskyi@gmail.com.

Ніколаєнко Богдан Анатолійович, кандидат технічних наук, заступник завідувача кафедри військово-гуманітарних дисциплін, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-6888-5947, nikolaenko_iszzi@ukr.net.

Самборський Євген Іванович, аспірант кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету, Київ, Україна, ORCID 0000-0003-4441-1947 seinauedu@gmail.com.

Sholokhov Serhii, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the special telecommunication systems academic department, Institute of special communications and information protection of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.

Samborsky Ivan, candidate of technical sciences, senior research officer, associate professor of the special telecommunication systems academic department, Institute of special communications and information protection of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.

Nikolaienko Bohdan, candidate of technical sciences, deputy head of the department of military and humanitarian disciplines, Institute of special communications and information protection of National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.

Samborskyi Ievgen, postgraduate student of Department organization of air transportation of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine.