

# Методика автоматичного визначення параметрів радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти

Нагорнюк О. А.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

E-mail: [Nahorniuk@i.ua](mailto:Nahorniuk@i.ua)

У статті запропоновано методику автоматичного визначення тривалості частотних елементів, часу початку першого і закінчення останнього стрибків, кількості й номіналів частот адресної групи та ширини спектра радіосигналу із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти за умов наявності довготривалих сторонніх випромінювань у частотному діапазоні роботи радіоприймального пристрою. Методика ґрунтується на аналізі частотно-часового розподілу, отриманого з використанням віконного перетворення Уелча, та складається із трьох основних етапів: виявлення сторонніх випромінювань, визначення часових параметрів, визначення частотних параметрів псевдовипадкового перестроювання робочої частоти. Виявлення довготривалих сторонніх випромінювань реалізується за часовим критерієм з використанням ітераційного підходу. На основі визначених частотних параметрів випромінювань формуються режекторні фільтри, центральні частоти яких дорівнюють центральним частотам завад, а ширина смуги пропускання кожного з них – ширині спектра випромінювання. Визначення часових та частотних параметрів радіосигналу здійснюється шляхом аналізу частотно-часового розподілення сигналу з урахуванням характеристик режекторних фільтрів. Для виключення із обчислень частин сигналу, що містять гармоніки, пов'язані зі зміною значень частотних елементів, часові вікна частотно-часового розподілу обмежено та суміщено із центрами стрибків. Запропоновано підхід до формування сітки робочих частот з використанням статистичного критерію та опорних частот, розрахованих шляхом мінімізації суми різниць поточних номіналів частотних елементів та кроку сітки частот. Для розрахунку часу закінчення останнього стрибка розроблено алгоритм на основі сумісного аналізу поточних значень центральних частот та енергії частотних елементів. Наведено результати перевірки працездатності та ефективності розробленої методики шляхом моделювання в програмному середовищі MATLAB у разі відношення сигнал/шум від -25 дБ.

*Ключові слова:* методика, радіосигнал, псевдовипадкове перестроювання робочої частоти, параметр, частотний елемент, завада, автоматизація, частотно-часове розподілення, періодограма.

DOI: [10.20535/RADAP.2020.80.31-38](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.31-38)

## Вступ

У сучасних засобах цифрового радіозв'язку для підвищення завадо- та розвідзахищеності використовується режим розширення спектру методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ). Так, більшість сучасних цифрових радіостанцій, що випускаються відомими виробниками, мають можливість працювати в режимі з ППРЧ [1–3]. Радіомоніторинг сигналів таких радіостанцій ускладнений широким діапазоном перестроювання робочої частоти, апріорною параметричною невизначеністю та наявністю в частотній смужі роботи сигналів інших радіоелектронних засобів (сторонніх випромінювань) [1]. Обчислення параметрів радіосигналів із ППРЧ потребує реалізації таких етапів [2]: визначення часових і частотних параметрів

ППРЧ, формування сітки частот адресної групи, встановлення закону перестроювання робочої частоти, визначення виду та параметрів модуляції сигналу.

Дана стаття присвячена розробленню методики розрахунку параметрів ППРЧ в умовах апріорної невизначеності та за наявності в аналізованій смужі частот сторонніх випромінювань.

## 1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі методи та алгоритми визначення параметрів ППРЧ ґрунтуються на аналізі одномірних або двомірних перетворень [2–13]. Перша група методів використовує лише інформацію про сигнал, отрима-

ну в частотній або часовій області: метод автокореляційної функції, метод аналізу переходів сигналу через нуль, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), алгоритм Герцеля, параметричні та непараметричні методи спектрального оцінювання. Загальним недоліком вказаних методів є обмежена кількість параметрів ППРЧ, а також низька точність їх визначення при наявних сторонніх випромінюваннях. Друга група методів базується на аналізі характеристик двомірних перетворень, у яких міститься інформація як про часові, так і про частотні параметри: перетворення Вінгера–Вілла, вейвлет-перетворення, віконні перетворення на основі ДПФ, періодограм та авторегресійних методів спектрального оцінювання. Хоча такі методи мають більшу розрахункову складність, вони забезпечують обчислення всіх параметрів ППРЧ. Загальним недоліком відомих підходів є низька точність визначення параметрів при наявних сторонніх випромінюваннях, центральні частоти яких знаходяться в межах адресної групи частот ППРЧ.

Тому метою досліджень є розроблення методики автоматичного розрахунку параметрів ППРЧ за умов апріорної невизначеності щодо наявності, кількості та параметрів сторонніх випромінювань.

## 2 Постановка завдання дослідження

Вхідними даними для методики є комплексні відліки сигнальної суміші, отримані на виході широкопосмугового радіоприймального пристрою (РПрП). Вважається, що всі значення частот адресної групи ППРЧ знаходяться в межах смуги роботи РПрП.

Математичну модель сигналу з ППРЧ за наявних сторонніх випромінювань можна записати у такому вигляді [3]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^{N_{HI}} s_a(t) e^{(j2\pi f_{H_i} t + \varphi_i)} g_h(t - kT_H - t_s) + \sum_{\nu=1}^{N_\nu} s_\nu(t) g_\nu(t - T_\nu - t_\nu) + \xi(t), \quad (1)$$

де  $s_a(t)$  – сигнал, що передається в режимі ППРЧ;  $f_{H_i} \in [f_{H_1}, f_{N_H}]$  – частота  $i$ -го частотного елемента (стрибка ППРЧ);  $N_H$  – кількість частот адресної групи;  $N_{HI}$  – кількість частотних елементів ППРЧ;  $T_H$  – тривалість частотного елемента ППРЧ;  $t_s$  – час початку першого частотного елемента ППРЧ;  $\varphi_i$  – початкова фаза;  $s_\nu(t)$  – сигнал  $\nu$ -ї завади;  $N_\nu$  – кількість завад у смузі приймання РПрП;  $T_\nu$  – тривалість сигналу  $\nu$ -ї завади;  $t_\nu$  – час початку сигналу  $\nu$ -ї завади;  $g_h(t), g_\nu(t)$  – імпульсні характеристики фільтрів;  $\xi(t)$  – адитивний гаусівський шум.

Після здійснення операції аналого-цифрового перетворення з частотою дискретизації  $F_s$  отриму-

ємо масив комплексних відліків сигналу  $r[i]$ . Вважається, що вид модуляції сигналу  $s_a(t)$  відомий або обчислюються відповідно до підходів, описаних в [14, 15]. Необхідно визначити часові та частотні параметри ППРЧ: тривалість частотного елемента  $T_H$ , час початку першого  $t_s$  стрибка, час закінчення останнього  $t_e$  стрибка, номінали  $f_{H_i}$ , кількість частот адресної групи  $N_H$ , ширина спектра  $B_H$ . Як показники ефективності розробленої методики використано відносну похибку визначення номіналів частот  $\delta f_H$ , а також ймовірності правильного визначення тривалості стрибків  $P_{TH}$  та кількості частот адресної групи  $P_{NH}$ .

## 3 Виклад основного матеріалу

Методика автоматичного визначення параметрів ППРЧ на фоні сторонніх випромінювань ґрунтується на аналізі частотно-часового перетворення (ЧЧП) сигналу, двомірний масив відліків якого містить інформацію про розподілення енергії сигналу як за частотою, так і за часом, та складається із таких етапів:

- виявлення та визначення параметрів сторонніх випромінювань, які знаходяться в смузі частот адресної групи ППРЧ;
- розрахунок тривалості частотних елементів;
- обчислення часу початку першого стрибка ППРЧ;
- визначення центральних (несучих) частот поточних стрибків та уточнення параметрів сторонніх випромінювань;
- формування сітки частот ППРЧ, визначення кількості та номіналів частот адресної групи;
- розрахунок ширини смуги частот ППРЧ;
- обчислення часу закінчення останнього стрибка ППРЧ та тривалості передачі.

Аналіз відомих ЧЧП, проведений у [3], показав, що найбільш доцільно для визначення параметрів ППРЧ використовувати віконну модифіковану періодограму Уелча, яка ґрунтується на алгоритмах швидкого перетворення Фур'є [12, 13]. Вона має низьку дисперсію спектральних оцінок та забезпечує точність розрахунку параметрів, що відповідає встановленим вимогам [3].

ЧЧП адитивної суміші радіосигналу сигналу з ППРЧ та п'яти сторонніх випромінювань, розраховане з використанням віконного перетворення на основі модифікованої періодограми Уелча, наведено на рис. 1(а), а амплітудно-частотний спектр (АЧС) одного часового фрагмента на рис. 1(б).

З рис. 1 видно, що в сигнальній суміші присутній сигнал з ППРЧ, у діапазоні частот адресної групи якого знаходяться п'ять сторонніх випромінювань

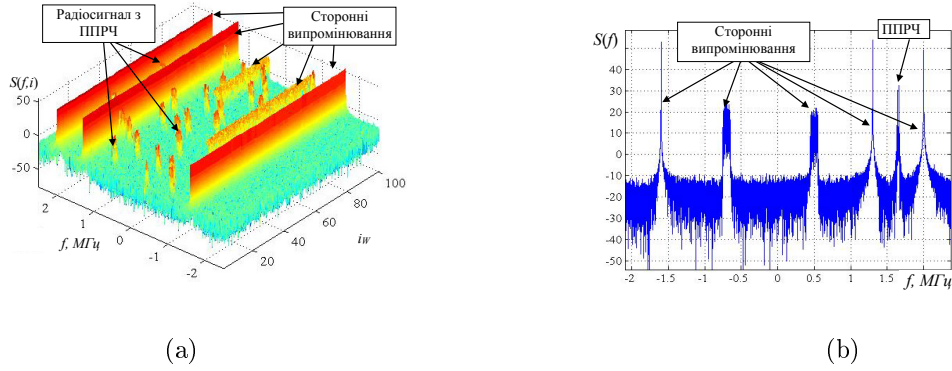


Рис. 1. Частотно-часове перетворення сигналу (а) та амплітудно-частотний спектр (АЧС) одного часового фрагмента (б)

(завад). Оскільки потужність випромінювань може перевищувати потужність корисного сигналу з ППРЧ в десятки разів, то для правильної ідентифікації частотних елементів такі завади необхідно виявити та зменшити їх вплив на подальші обчислення.

Тому на першому етапі знаходять сторонні випромінювання, амплітуда спектральних гармонік в АЧС яких перевищує амплітуду спектральних гармонік ППРЧ сигналу. Як показник для ідентифікації завад використовують мінімальний час знаходження завади на одній частоті  $t_\nu$ . Якщо значення  $t_\nu$  більше встановленого порога  $\gamma t_\nu$ , то приймається рішення про наявність на даній частоті завади та визначається її центральна частота  $f_\nu$ , ширина спектра  $B_\nu$ , час початку  $t_{\nu s}$  і час закінчення  $t_{\nu e}$ . Відповідно до отриманих значень формується режекторний фільтр, частотні характеристики якого відповідають параметрам стороннього випромінювання (центральна частота –  $f_{RF} = f_\nu$ ; ширина смуги пропускання –  $B_{RF} = B_\nu$ ). Якщо амплітуда декількох завад близька за величиною, то формується двомірний масив значень частот усіх спектральних піків, амплітуда яких перевищує встановлений пороговий рівень, а подальша ідентифікація завад здійснюється шляхом аналізу даного масиву. Як результат отримуємо масив режекторних фільтрів  $R_F[j]$ , де  $j = 1 \dots N_\nu$ . Кожен елемент масиву  $R_F[j]$  є структурою, яка містить чотири параметри  $\{f_{RF}, B_{RF}, t_{\nu s}, t_{\nu e}\}$ . Порядок вибору параметрів для двомірних перетворень при виявленні сторонніх випромінювань подано в [3].

Розрахунок тривалості частотних елементів здійснюється на основі аналізу похідної від частоти гармонік з максимальною амплітудою ЧЧП з врахуванням часового положення та частотних параметрів режекторних фільтрів  $R_F[j]$ . Для зменшення обчислювальної складності розрахунок може здійснюватися для часового відрізка, який відповідає очікуваній тривалості 30 частотних елементів.

Для кожного АЧС визначається частота гармоніки з максимальною амплітудою  $f_m[i]$ :

$$f_m[i] = \arg \left( \max_k (P_{WRF}[i, k]) \right), \quad (2)$$

де  $P_{WRF}[i, k], i = 1 \dots N_r, k = 1 \dots N_W$  – АЧС, розрахований методом періодограми Уелча та відфільтрований відповідно до параметрів  $R_F[j]$ ;  $N_r$  – кількість періодограм;  $N_W$  – розмірність періодограми.

Розраховується похідна від частоти  $f_m[i]$ :

$$df_m[i] = |f_m[i+1] - f_m[i]|. \quad (3)$$

У масиві  $df_m[i]$  здійснюється пошук пікових значень, які відповідають часовим положенням стрибків ППРЧ:

$$i_m[n] = \underset{df_m > \eta df_m}{\text{Peak}} (df_m[i]), \quad (4)$$

де  $\text{Peak}(\cdot)$  – функція пошуку піків похідної  $df_m$ , що перевищують поріг  $\eta df_m$ .

Розраховуються значення поточної тривалості частотних елементів:

$$T_{Hi}[n] = \frac{N_p}{F_s} (i_m[n+1] - i_m[n]), \quad (5)$$

де  $N_p$  – крок розрахунку періодограми [3].

Для підвищення точності розрахунку  $T_H$  із масиву  $T_{Hi}[n]$  видаляються аномальні значення, які виникають за рахунок хибної ідентифікації гармонік АЧС відповідно до алгоритму запропонованого в [3].

Значення тривалості частотного елемента  $T_H$  розраховується як середнє арифметичне значення масиву  $T_{Hi}[n]$ :

$$T_H = E(T_{Hi}[n]), \quad (6)$$

де  $E(\cdot)$  – оператор розрахунку середнього арифметичного значення.

Час початку сигналу з ППРЧ  $t_s$  обчислюється як часове положення першого стрибка ППРЧ з тривалістю  $T_H$ .

Визначення несучих частот поточних стрибків реалізується на часових ділянках, що відповідають центральним положенням частотних елементів (як показано на рис. 2).

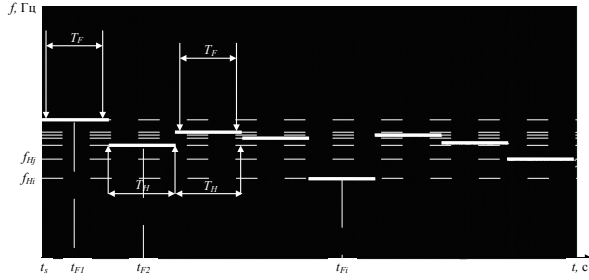


Рис. 2. Часове положення відрізків сигналу для розрахунку частотних параметрів

На вказаних проміжках часу розраховується АЧС, здійснюється режекторна фільтрація відповідно до масиву фільтрів  $R_F[j]$ , знаходяться гармоніки з максимальною амплітудою, приймається рішення про їх приналежність до частотних елементів ППРЧ або сторонніх випромінювань та обчислюється несуча частота елемента ППРЧ з використанням методу, що відповідає виду модуляції, застосованому в сигналі. Якщо вид модуляції невідомий, то замість несучої частоти розраховується центральна частота  $f_0$ :

$$f_0 = \frac{\sum_{k=1}^{N_W} \frac{F_s}{N_W} \cdot P_{WRF}[k]}{\sum_{k=1}^{N_W} P_{WRF}[k]} \quad (7)$$

Обмеження часових ділянок при визначенні номіналів частотних елементів дозволяє виключити із розрахунків відрізки сигналу, на яких здійснюється перестроювання робочої частоти, та усунути вплив сторонніх гармонік, пов'язаних зі зміною частоти генератора, на процес визначення параметрів ППРЧ. Для більшості радіостанцій час зміни частотних елементів не перевищує 10% від їх тривалості [2], тому часовий проміжок визначення параметрів повинен бути  $T_F \leq 0,9T_H$ . Положення середини часового відрізка  $t_{Fi}$ , на якому розраховуються параметри, визначається як:

$$t_{Fi} = t_s + (i_p - 1)T_H + \frac{T_H}{2}, \quad (8)$$

де  $i_p$  – порядковий номер стрибка ППРЧ.

З рис. 2 видно, що крок розрахунку періодограми має бути  $N_p = T_H F_s$ .

При обчисленні несучих частот поточних стрибків ППРЧ мінімальна довжина вікна періодограми  $N_W$  визначається величиною необхідної роздільної здатності за частотою  $\Delta F$ , а її верхнє значення обмежене величиною часового проміжку  $T_F$ :

$$\frac{F_s}{\Delta F} \leq N_W \leq \frac{T_F F_s}{M_W}, \quad (9)$$

де  $M_W$  – кількість вікон, що використовуються для розрахунку періодограми.

Процес розрахунку несучих частот є циклічним, під час якого зчитуються дані на часових відрізках, що обмежуються параметрами  $t_{Fi}$  та  $T_F$ , розраховується АЧС, здійснюється режекторна фільтрація в частотній області відповідно до масиву параметрів фільтрів  $R_F[j]$ , формується масив спектральних піків, у якому за часовим критерієм виявляються вузькосмугові завади. Якщо заваду виявлено, визначають її параметри, формується режекторний фільтр, параметри якого заносять до масиву  $R_F[j]$ , а циклічний процес повертається на крок назад. Якщо заваду не виявлено, здійснюється розрахунок несучої частоти методом, що відповідає виду модуляції, застосованому в сигналі  $M_T$ , або за виразом (7). Більш детально методи визначення несучої частоти сигналів із цифровими видами модуляції розглянуто в [14, 15]. По завершенню циклу отримуємо масив поточних значень частот  $f_{Hi}[n]$ , розмірність якого відповідає кількості стрибків ППРЧ в аналізованому фрагменті сигналу. Крім того на даному етапі розраховуються енергії частотних елементів  $E_{Hi}[n]$ .

Формування сітки частот ППРЧ та визначення номіналів частот адресної групи здійснюється шляхом оброблення даних із масиву  $f_{Hi}[n]$ . Даний масив може містити помилкові значення частот, які з'являються за рахунок низького відношення сигнал/шум (ВСШ) або допущених помилок при ідентифікації завод. Усунення таких хибних значень здійснюється в два етапи.

На першому етапі в масиві  $f_{Hi}[n]$  виявляються та усуваються частоти, які не відповідають вимогам статистичного критерію:

$$E(f_{Hi}[n]) - k_s STD(f_{Hi}[n]) \leq f_{Hi}[n] \leq E(f_{Hi}[n]) + k_s STD(f_{Hi}[n]), \quad (10)$$

де  $STD()$  – оператор розрахунку середнього квадратичного відхилення;  $1 \leq k_s \leq 3$  – коефіцієнт, що визначає межі критерію.

На другому етапі усуваються частоти, значення яких не відповідає прогнозованій сітці частот ППРЧ, розрахунок якої здійснюється на основі опорних частот. За опорні приймаються частоти, різниця між якими є найближчою до значення кроку сітки ППРЧ  $f_{Gr}$ . Так, для обчислення чотирьох опорних частот мінімізується похибка  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon = & O_A \left( \frac{f_{A1}^j - f_{A2}^j}{f_{Gr}} \right) + O_A \left( \frac{f_{A1}^j - f_{A3}^j}{f_{Gr}} \right) + \\ & + O_A \left( \frac{f_{A1}^j - f_{A4}^j}{f_{Gr}} \right) + O_A \left( \frac{f_{A2}^j - f_{A3}^j}{f_{Gr}} \right) + \\ & + O_A \left( \frac{f_{A2}^j - f_{A4}^j}{f_{Gr}} \right) + O_A \left( \frac{f_{A3}^j - f_{A4}^j}{f_{Gr}} \right), j = 1, 2, \dots, N_C, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $O_A(X) = |X - \text{Round}(X)|$ ;  $\text{Round}()$  – округлення до найближчого цілого числа;  $f_{A1}^j, f_{A2}^j, f_{A3}^j, f_{A4}^j$  – значення  $j$ -ї комбінації частот, що використовуються в розрахунку.

Кількість можливих комбінацій частот  $N_C$  визначаємо відповідно до теорії комбінаторики  $N_C = C_{N_A}^{N_O}$ , де  $N_A$  – загальна кількість частот, що використовуються для розрахунку сітки, а  $N_O$  – кількість опорних частот [16]. Так, у разі  $N_A = 32$  та  $N_O = 4$  кількість можливих комбінацій для розрахунку похибки  $\varepsilon$  буде дорівнювати  $N_C = 35960$ .

Частоти  $j$ -го набору  $f_{A1}^j, f_{A2}^j, f_{A3}^j, f_{A4}^j$ , який забезпечує мінімальну похибку  $\varepsilon$ , приймаються за опорні та на їх основі формується сітка прогнозованих частот ППРЧ за ітераційними процедурами:

$$\begin{aligned} f_{GP}[i] &= f_{A1} + if_{Gr}, \\ &\text{while } if_{Gr} \leq \max(f_{Hi}[n]) + f_{Gr}; \\ f_{GP}[i] &= f_{A1} - if_{Gr}, \\ &\text{while } if_{Gr} \leq \min(f_{Hi}[n]) - f_{Gr}; \\ f_{GP}[i] &= \text{sort}(f_{GP}[i]), \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\max(f_{Hi}[n]), \min(f_{Hi}[n])$  – максимальне та мінімальне значення масиву  $f_{Hi}[n]$ ;  $\text{sort}()$  – функція сортування масиву за зростанням його значень;  $f_{Gr}$  – крок сітки частот ППРЧ.

Номинали частот адресної групи розраховуємо шляхом пошуку різниць кожної з частот  $f_{Hi}[n]$  та значень сітки з масиву  $f_{GP}[i]$ , що не перевищують встановленого порога  $\eta_G$ :

$$|f_{Hi}[n] - f_{GP}[i]| \leq \eta_G. \quad (13)$$

Якщо масив  $f_{Hi}[n]$  містить декілька частот, що відповідають одному значенню із масиву сітки ППРЧ  $f_{GP}[i]$ , то вони усереднюються. Як результат отримуємо масив номіналів частотних елементів  $f_H[k]$ .

Кількість частот адресної групи  $N_H$  дорівнює розмірності масиву  $f_H[k]$ .

Ширину смуги частот ППРЧ  $B_H$  визначаємо за виразом:

$$B_H = |f_H[N_H] - f_H[1]| + B_C, \quad (14)$$

де  $B_C$  – ширина спектра сигналу, яка визначається відповідно до [14, 15].

Час закінчення останнього стрибка ППРЧ  $t_e$  обчислюється на основі аналізу масивів несучих частот та енергій поточних стрибків  $f_{Hi}[n]$  та  $E_{Hi}[n]$  відповідно до енергетичного та частотного критеріїв.

Пошук часу  $t_s$  за енергетичним критерієм здійснюється відповідно до виразу:

$$\begin{aligned} t_e &= t_{Fn} + \frac{T_H}{2}, \\ if(E_{Hi}[n] < E_{min}) \cap (E_{Hi}[n+1] < E_{min}); \quad (15) \\ E_{min} &= E(E_{Hi}[n]) \eta E_H, \end{aligned}$$

де  $E_{min}$  – поріг за енергією;  $\eta E_H$  – коефіцієнт, що визначає поріг  $E_{min}$ ;  $t_{Fn}$  – часове положення  $n$ -го стрибка (рис. 2).

Відповідно до виразу (15) час закінчення ППРЧ визначається коли два підряд частотні елементи мають енергію в 10–20 разів меншу, ніж середня енергія сигналу.

Пошук часу  $t_e$  за частотним критерієм реалізується шляхом перевірки відповідності різниці несучих частот сусідніх стрибків кроку сітки ППРЧ  $f_{Gr}$ :

$$\begin{aligned} t_e &= t_{Fn} + \frac{T_H}{2}, \\ if \left| \text{Round} \left( \frac{|f_{Hi}[n] - f_{Hi}[n+1]|}{f_{Gr}} \right) f_{Gr} - \right. \\ &\quad \left. - |f_{Hi}[n] - f_{Hi}[n+1]| \right| > \eta G_r, \end{aligned} \quad (16)$$

де  $\eta G_r = 0,75 f_{Gr}$  – поріг за частотою.

При задовільненні вимог одного із критеріїв розраховується час закінчення останнього стрибка ППРЧ  $t_e$  та тривалість передачі  $T_{FHSS}$ :

$$T_{FHSS} = t_e - t_s. \quad (17)$$

Таким чином, розроблена методика дозволяє в автоматичному режимі визначити часові (тривалість частотного елемента  $T_H$ , час початку  $t_s$ , час закінчення  $t_e$ , тривалість передачі  $T_{FHSS}$ ) та частотні (кількість  $N_H$  та номинали частот адресної групи  $f_H[k]$ , ширина смуги  $B_H$ ) параметри ППРЧ за умов наявності сторонніх випромінювань.

Перевірку працездатності та ефективності розробленої методики проведено шляхом її моделювання в програмному середовищі MATLAB відповідно до теорії статистичних випробувань. Вхідний сигнал формувався з різновидами фазової та частотної маніпуляції, а його спектр розширювався методом ППРЧ. До сигналу додавалися білий гаусівський шум для забезпечення ВСШ від -25 дБ до 10 дБ та сторонні випромінювання (сигнали з частотною модуляцією, частотною та фазовою маніпуляціями, гармонічні коливання). Отриману сигнальну суміш використовували для дослідження розробленої методики. Для кожного зі значень ВСШ здійснювалося 500 розрахунків параметрів ППРЧ, результати яких усереднювалися.

Результати досліджень показали, що відносна похибка визначення номіналів частотних елементів  $\delta f_H$  залежить від виду застосованої модуляції та відповідає результатам, отриманим у роботах [14, 15]. Статистичні ймовірності правильного визначення тривалості стрибків  $P_{TH}$  та кількості частот адресної групи  $P_{NH}$  визначалися як відношення кількості правильно обчислених значень параметрів  $T_H$  і  $N_H$  до загальної кількості проведених розрахунків, а їх залежності від ВСШ наведено в табл. 1.

Табл. 1 Ймовірність правильного визначення тривалості та кількості частотних елементів

ВСШ, дБ	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18
$P_{TH}$	0,03	0,23	0,63	0,96	0,99	1	1	1
$P_{NH}$	0,89	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	1	1

З табл. 1 випливає, що розроблена методика забезпечує ймовірність правильного визначення параметрів ППРЧ від 0,96 при ВСШ від -22 дБ для часових параметрів та -24 дБ для частотних параметрів.

## Висновки

Розроблена методика забезпечує автоматичне визначення часових та частотних параметрів ППРЧ за умов наявності сторонніх випромінювань та ґрунтується на аналізі двомірного розподілу енергії сигнальної суміші, отриманого з використанням віконної модифікованої періодограми Уелча. Наукова новизна отриманих результатів полягає в підвищенні ймовірності правильного визначення параметрів ППРЧ за рахунок виявлення сторонніх випромінювань та їх режекторної фільтрації, обмеження тривалості вікон періодограми Уелча, прив'язки їх за часом відносно центрів частотних елементів, а також застосування нового підходу до формування сітки опорних частот. Крім того запропоновано підхід до визначення часу закінчення ППРЧ, застосування якого дозволить зменшити обчислювальну складність за рахунок виключення із обчислень відліків сигнальної суміші за межами сигналу з ППРЧ. Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на визначення параметрів декількох радіосигналів із ППРЧ, що передаються в одному частотному діапазоні.

## Перелік посилань

- Radio monitoring: automated systems and their components / A. M. Rembovsky, A. V. Ashikhmin, V. A. Kozmin, S. M. Smolskiy. M.: Springer international publishing AG, 2018. – 457 p.
- Макаренко С. И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : Монография / С. И. Макаренко, М. С. Иванов, С. А. Попов. Санкт-Петербург : Своё изд-во, 2013. – 166 с.
- Нагорнюк О. А. Метод автоматичного визначення часових параметрів радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти на фоні вузько-смугових перешкод / О. А. Нагорнюк // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. праць. Житомир: ЖВІ. 2018. – Вип. 15. – с. 53–64.
- Kanaa A. A robust parameter estimation of FHSS signals using time-frequency analysis in a non-cooperative environment / A. Kanaa, A. Zuri Sha'ameri // Physical Communication. 2018. – № 26. – pp. 9–20.
- Chevva L. FH signal interception based on the time-frequency spectrogram by image enhancement techniques / L. Chevva, G. Sagar // International Journal of Engineering Research and Applications. 2012. – Vol. 2, Issue 2. – pp. 687–692.
- Draganic A. FHSS signal characterization based on the crossterms free time-frequency distributions / A. Draganic, I. Orovic, S. Stankovic // 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing. Budva. – 2013. – pp. 443–447.
- Li T. Parameter estimation of FH signals based on STFT and music algorithm / T. Li, Y. Tang, Y. Lv // Computer Application and System Modeling. – 2010. –pp. 84–96.
- Overdyk H. F. Detection and estimation of frequency hopping signals using wavelet transforms. Thesis for the degree of master of science in electrical engineering. Monterey : Naval Postgraduate School. – 1997. – 114p.
- Hosseini S. N. Joint detection and hop parameters estimation of slow FHSS/MFSK signals using DHWT-AC technique in Rayleigh block fading channels / S. Hosseini, H. Razavi // Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong. – 2009. – pp. 55–59.
- Jaiswal K. Spectral sensing for cognitive radio: detection and estimation of adaptive frequency hopping signal // NCC 2009. IIT Guwahati. – 2009. – pp. 224–228.
- Qin Y. A new method of parameter estimation of frequency-hopping signal / Y. Qin, M. Lv // 2nd International Conference on Information, Electronics and Computer. – 2014. – pp. 138–141.
- Lyons R. G. Understanding digital signal processing, 3d ed. / R. G. Lyons. Boston : Prentice Hall, 2011. – 858 p.
- Ifeachor E. Digital signal processing: a practical approach, 2d ed / E. Ifeachor, B. Jervis. New Jersey : Prentice Hall, 2001. – 906 p.
- Rancy F. Spectrum monitoring. Handbook / F. Rancy. Geneva : International Telecommunication Union, 2011. – 678 p.
- Нагорнюк О. А. Методика автоматизованого визначення параметрів сигналу та розпізнання виду модуляції засобами радіомоніторингу в умовах апріорної параметричної невизначеності / О. А. Нагорнюк, О. О. Писарчук, В. В. Павлюк // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ : НУОУ. – 2014. – Вип. 1 (19). – с. 63–69.
- Rosen Kenneth H., Discrete Mathematics and Its Applications, 8th ed. / H. Rosen Kenneth. New York : McGraw-Hill, 2019. – 1118 p.

## References

- [1] Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A. and Smolskiy S. M. (2018) *Radio monitoring: automated systems and their components*, Springer international publishing AG, part of Springer Nature 2018, 461 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74277-9>.
- [2] Makarenko S. I., Ivanov M. S. and Popov S. A. (2013), *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastoty* [Interference immunity of communication systems with frequency-hopping spread spectrum], 166 p.
- [3] Nahorniuk O. A. (2018) Metod avtomatyzovanoho vyznachennia chasovykh parametriv radiosyhnaliv iz psevdovypadkovym perestroiuivanniam robochoi chastoty na foni vuzkosmuhovykh pereshkod [Method of automatic time parameters estimation of radio signals with frequency-hopping spread spectrum against the background of narrow-band interferences], *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems*, No. 15, ZVI, Zhytomyr, pp. 53–64.
- [4] Kanaa A. and Sha'ameri A.Z. (2018) A robust parameter estimation of FHSS signals using time–frequency analysis in a non-cooperative environment. *Physical Communication*, Vol. 26, , pp. 9-20, DOI: 10.1016/j.phycom.2017.10.013.
- [5] Chevva Lahari and Sagar G.V.R. (2012), FH Signal Interception Based on the Time-Frequency Spectrogram by Image Enhancement Techniques, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, Issue 2, pp. 687–692.
- [6] Draganic A., Orovic I. and Stankovic S. (2013) FHSS signal characterization based on the crossterms free time-frequency distributions, *2013 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, pp. 443–447, DOI: 10.1109/meco.2013.6601343.
- [7] Li Tong, Tang Yinhui and Lv Jun (2010) Parameter estimation of FH signals based on STFT and music algorithm. *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCA SM 2010)*, pp. V5-232-V5-236, DOI: 10.1109/iccasm.2010.5619186.
- [8] Overdyk H. F. (1997) *Detection and estimation of frequency hopping signals using wavelet transforms*. Thesis for the degree of master of science in electrical engineering, Naval Postgraduate School, Monterey, 114 p.
- [9] Hosseini S. N. and Razavi H. (2009), Joint Detection and Hop Parameters Estimation of Slow FHSS/MFSK Signals Using DHWT-AC Technique in Rayleigh Block Fading Channels, *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, Vol. I, pp.55–59.
- [10] Jaiswal Kapil (2009) Spectral Sensing for Cognitive Radio: Detection and Estimation of Adaptive Frequency Hopping Signal, *NCC 2009*, IIT Guwahati, pp. 224–228.
- [11] Yongli Qin and Ming Lv (2014) A New Method of Parameter Estimation of Frequency-Hopping Signal, *Proceedings of the 2nd International Conference on Information, Electronics and Computer*, pp. 138–141, DOI: 10.2991/icieac-14.2014.31.
- [12] Lyons R. G. (2011) *Understanding digital signal processing*, Prentice Hall, Boston, 858 p.
- [13] Ifeachor E. and Jervis B. (2001) *Digital signal processing: a practical approach*, Prentice Hall, New Jersey, 906 p.
- [14] Rancy F. (2011) *Spectrum monitoring*. Handbook. International Telecommunication Union, Geneva, 678 p.
- [15] Nahorniuk O. A., Pysarchuk O. O. and Pavliuk V. V. (2014) Metodyka avtomatyzovanoho vyznachennia parametriv syhnalu ta rozpoznavannia vydu modulatsii zasobamy radiomonitorynhu v umovakh apriornoj parametrychnoi nevyznachenosti [Method of the automated determination of signal parameters and modulation type recognition by radiomonitoring facilities under parametric uncertainty], *Modern information technologies in the sphere of security and defence*, No 1 (19), pp. 63–69.
- [16] Kenneth H. Rosen (2019) *Discrete Mathematics and Its Applications*, 8th ed., McGraw-Hill, New York, 1118 p.

## Методика автоматического определения параметров радиосигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты

Нагорнюк А. А.

В статье предложена методика автоматического определения длительности частотных элементов, времени начала первого и окончания последнего прыжков, количества и номиналов частот адресной группы и ширины спектра радиосигнала с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при наличии посторонних излучений большой длительности в частотном диапазоне работы радиоприемного устройства. Методика основана на анализе частотно-временного распределения, полученного с использованием оконного преобразования Уэлча, и состоит из трех основных этапов: выявление посторонних излучений, определение временных параметров, определение частотных параметров псевдослучайного перестроения рабочей частоты. Выявление посторонних излучений реализуется по временному критерию с использованием итерационного подхода. На основе определенных частотных параметров излучений формируются режекторные фильтры, центральные частоты которых равны центральным частотам помех, а ширина полосы пропускания каждого из них – ширине спектра излучения. Определение временных и частотных параметров радиосигнала осуществляется путем анализа частотно-временного распределения сигнала с учетом характеристик режекторных фильтров. Для исключения из вычислений частей сигнала, содержащих гармоники, связанные с изменением значений частотных элементов, временные окна частотно-временного распределения ограничены и совмещены с центрами прыжков. Предложен подход к формированию сетки рабочих частот с использованием статистического критерия и опорных частот, рассчитанных путем минимизации суммы разниц текущих номиналов частотных элементов и шага сетки частот. Для расчета времени окончания последнего прыжка разработан алгоритм на основе совместного анализа текущих значений центральных частот и энергии частотных элементов. Приведены результаты проверки работоспособности и эффективности разработанной методики путем моделирования в программной среде MATLAB при отношении сигнал/шум от -25 дБ.

**Ключевые слова:** методика, радиосигнал, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, параметр,

частотный элемент, помеха, автоматизация, частотно-временное распределение, периодограмма.

## Method of Automatic Parameters Estimation of Radio Signals with Frequency-Hopping Spread Spectrum

*Nahorniuk O. A.*

Method of automatically estimation of frequency elements duration, first hop beginning time, last hop ending time, the number and nominals of target group frequencies and the bandwidth of radio signal with frequency-hopping spread spectrum in the presence of durable extraneous emissions in the frequency range of receiver is proposed in the article. The method is based on the analysis of the time-frequency distribution obtained using the Welch window transformation and consists of three main stages: extraneous emissions detection, time parameters estimation and frequency parameters estimation of frequency-hopping spread spectrum. The detection of extraneous emissions is carried out according to the time criterion using an iterative approach. On the basis of estimated emissions frequency parameters band-rejection filters are formed, which central frequencies are equal to the central interferences frequencies

and stopband are equal to emissions spectrum width. The estimation of time and frequency parameters of the radio signal is carried out by analyzing the signal time-frequency distribution, taking into account the characteristics of the band-rejection filters. To exclude from the calculation of the parts of the signal containing harmonics associated with the change in the values of frequency elements, the time windows of the time-frequency distribution are limited and aligned with the centers of hops. An approach to the formation of operating frequencies grid using the statistical criterion and base frequencies, calculated by minimizing the sum of the differences between the current nominal frequency elements and the frequency grid step is proposed. An algorithm for calculation the last hop ending time based on a joint analysis of the current values of the central frequencies and the energies of the frequency elements is developed. The results of testing the operability and efficiency of the developed method by modeling in the MATLAB software environment with a signal-to-noise ratio of -25 dB are given.

*Key words:* method, radio signal, frequency-hopping spread spectrum, parameter, frequency element, interference, automation, time-frequency distribution, periodogram.