

МЕТОД АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛІВ ІЗ ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕСТРОЮВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ НА ФОНІ ВУЗЬКОСМУГОВИХ ПЕРЕШКОД

У статті запропоновано метод автоматичного визначення тривалості частотних елементів радіосигналу з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти та часу початку першого стрибка за умов наявності вузькосмугових перешкод у частотному діапазоні роботи відповідної телекомунікаційної системи. Метод ґрунтується на аналізі частотно-часового розподілу, отриманого з використанням віконного перетворення Уелча, та складається із двох етапів: виявлення вузькосмугових перешкод і визначення часових параметрів псевдовипадкового перестроювання робочої частоти. Виявлення вузькосмугових перешкод реалізується за часовим критерієм з використанням ітераційного підходу. На основі визначених частотних параметрів перешкод формуються режекторні фільтри, центральні частоти яких дорівнюють центральним частотам перешкод, а ширина смуги пропускання кожного з них – ширині їх спектра. Визначення часових параметрів псевдовипадкового перестроювання робочої частоти здійснюється шляхом розрахунку та аналізу частотно-часового розподілення сигналу з урахуванням характеристик режекторних фільтрів. Для підвищення точності обчислення часових параметрів розроблено алгоритм виявлення аномальних величин у масиві розрахованих тривалостей частотних елементів на базі статистичного критерію мінімальної дисперсії. Наведено результати дослідження розробленого методу при відношенні сигнал/шум від -25 дБ.

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

Постановка проблеми в загальному вигляді. Методи розширення спектра шляхом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) знаходять широке застосування в сучасних системах радіозв'язку та передачі даних [1–4]. Так, практично всі цифрові радіостанції, що випускаються відомими виробниками, мають можливість працювати в режимі ППРЧ. Розповсюдженість даного методу пов'язана насамперед із можливістю забезпечення високої перешкодозахищеності та розвідзахищеності системи радіозв'язку, а також із можливістю організації багатостанційного доступу при роботі в пакетних радіомережах [3]. Радіомоніторинг систем зв'язку з ППРЧ є важливим завданням, вирішення якого ускладнене низкою причин: відсутністю апріорної інформації про параметри ППРЧ та модуляції сигналу; широким діапазоном перестроювання робочої частоти; наявністю в частотній смузі роботи систем із ППРЧ сторонніх випромінювань [1]. Оскільки робочий діапазон більшості ультракороткохвильових радіостанцій із ППРЧ знаходиться в межах частотного діапазону 30–512 МГц [4], то основними заважаючими сторонніми випромінюваннями для них є сигнали інших аналогових та цифрових

радіостанцій, що мають ширину спектра від 0,5 кГц до 200 кГц. Тому в більшості випадків завдання оцінювання параметрів радіосигналів з ППРЧ зводиться до їх визначення на фоні вузькосмугових перешкод. Обчислення параметрів ППРЧ вимагає реалізації таких етапів [2, 3]: визначення часових і частотних параметрів, формування сітки частот адресної групи, встановлення закону перестроювання робочої частоти. Дана стаття присвячена удосконаленню підходів визначення часових параметрів сигналів з ППРЧ, реалізація яких є необхідною передумовою для виконання інших етапів обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи та алгоритми визначення параметрів ППРЧ, описані у відомих публікаціях [5–18], можна розділити на дві групи: на основі одновимірних та двовимірних перетворень. Перша група методів використовує для аналізу лише інформацію про сигнал, отриману в частотній або часовій області: метод автокореляційної функції [5, 6], метод аналізу переходів сигналу через нуль [6], дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) [5], алгоритм Герцеля [5], параметричні та непараметричні методи спектрального оцінювання [5, 8]. Загальним недоліком вказаних методів є обмежена кількість параметрів ППРЧ, а також низька точність їх визначення при наявних сторонніх випромінюваннях у смузі ППРЧ. Друга група методів базується на аналізі характеристик двовимірних перетворень, у яких міститься інформація як про часові, так і про частотні параметри: перетворення Вінгера – Вілла [7], вейвлет-перетворення [9–10], віконні перетворення на основі ДПФ, періодограм та авторегресійних методів спектрального оцінювання [11–18]. Хоча такі методи мають більшу розрахункову складність, вони забезпечують обчислення всіх параметрів ППРЧ. Загальним недоліком відомих підходів є низька точність визначення параметрів за наявних сторонніх випромінювань, центральні частоти яких знаходяться в межах адресної групи частот ППРЧ.

Тому **метою** досліджень є розроблення методу автоматичного визначення часових параметрів ППРЧ за умов апріорної невизначеності щодо наявності, кількості та параметрів вузькосмугових перешкод.

Постановка завдання дослідження. Вхідними даними для методу є комплексні відліки сигнальної суміші, отримані на виході широкосмугового радіоприймального пристрою (РПрП). Вважається, що всі частоти адресної групи ППРЧ знаходяться в межах частотної смуги роботи РПрП.

Математичну модель сигналу з ППРЧ за наявних вузькосмугових перешкод можна записати в такому вигляді [3]:

$$r(t) = \sum_{i=1}^{N_H} s_a(t) e^{j2\pi f_{H_i} t + \varphi_i} g_h(t - kT_H - t_s) + \sum_{v=1}^{N_v} s_v(t) g_v(t - T_v) + \xi(t), \quad (1)$$

де $s_a(t)$ – сигнал, що передається в режимі ППРЧ;

f_{H_i} – частота i -го частотного елемента (стрибка ППРЧ);

N_H – кількість частотних елементів ППРЧ;

T_H – тривалість частотного елемента ППРЧ;

t_s – час початку першого частотного елемента ППРЧ;

φ_i – початкова фаза;

$s_v(t)$ – вузькосмуговий сигнал v -ї перешкоди;

N_v – кількість перешкод у смузі приймання РПрП;

T_v – тривалість сигналу v -ї перешкоди;

$g_n(t), g_v(t)$ – імпульсні характеристики формувальних фільтрів;

$\xi(t)$ – адитивний гаусівський шум.

Після здійснення операції аналого-цифрового перетворення з частотою дискретизації F_s отримуємо масив комплексних відліків сигналу $r[i]$. Необхідно визначити тривалість частотного елемента ППРЧ T_H та час початку першого стрибка ППРЧ t_s . Відносна похибка визначення тривалості T_H (час перебування передавача на одній частоті ППРЧ) не має перевищувати встановленої величини δT_H , яка в більшості випадків дорівнює 10% від тривалості T_H . Такої точності достатньо для реалізації подальших етапів обробки сигналу та розпізнавання типу радіопередачі. Тому в даній роботі за показник ефективності розробленого методу буде використовуватися ймовірність правильного визначення часових параметрів.

Виклад основного матеріалу. Метод автоматичного визначення часових параметрів сигналів з ППРЧ на фоні вузькосмугових перешкод ґрунтується на аналізі частотно-часового перетворення сигналу, двомірний масив відліків якого містить інформацію про розподілення енергії сигналу як за частотою, так і за часом. Аналіз відомих частотно-часових перетворень [5–18], основні переваги та недоліки яких наведено в табл. 1, показав, що найбільш доцільно для вирішення завдання визначення часових параметрів ППРЧ вибрати віконну модифіковану періодограму Уелча.

Таблиця 1

Переваги та недоліки частотно-часових перетворень

Перетворення	Переваги	Недоліки
Віконне ДПФ	Простота реалізації; невелика обчислювальна складність; наявність апробованих алгоритмів та програмних модулів	Низька частотно-часова роздільна здатність
Вейвлет-перетворення	Локалізує низькочастотні деталі сигналу в частотній області, а високочастотні – у часовій	Наявність великої кількості надлишкової інформації та розрахункова складність
Перетворення Вінгера – Вілла	Висока роздільна здатність, порівняно з віконним ДПФ	Породжує побічні частотні компоненти
Перетворення на основі параметричних методів спектрального оцінювання (Юла – Уокера, Берга тощо)	Висока роздільна здатність за частотою, порівняно з віконним ДПФ	Складність вибору порядку авторегресійної моделі; “розчеплення” спектральних піків
Перетворення на основі періодограм (Барлетта, Даньєла, Уелча тощо)	Менша дисперсія оцінки спектральної щільності потужності	Порівняно низька частотно-часова роздільна здатність

Періодограма Уелча має низьку дисперсію спектральних оцінок, її математичний апарат ґрунтується на алгоритмах швидкого перетворення Фур'є, а точність визначення параметрів відповідає встановленим вимогам.

Суть методу автоматичного визначення часових параметрів полягає в розрахунку частотно-часового розподілення сигналу, пошуку часових положень зміни частотних позицій гармонік з енергією, що перевищує встановлений поріг, аналізі отриманих масивів даних для виявлення часових переходів, що відповідають стрибкам ППРЧ, та розрахунку часових параметрів.

Частотно-часове перетворення адитивної суміші сигналу з ППРЧ та чотирьох вузькосмугових сигналів, розраховане з використанням віконного перетворення на основі модифікованої періодограми Уелча, наведено на рис. 1.

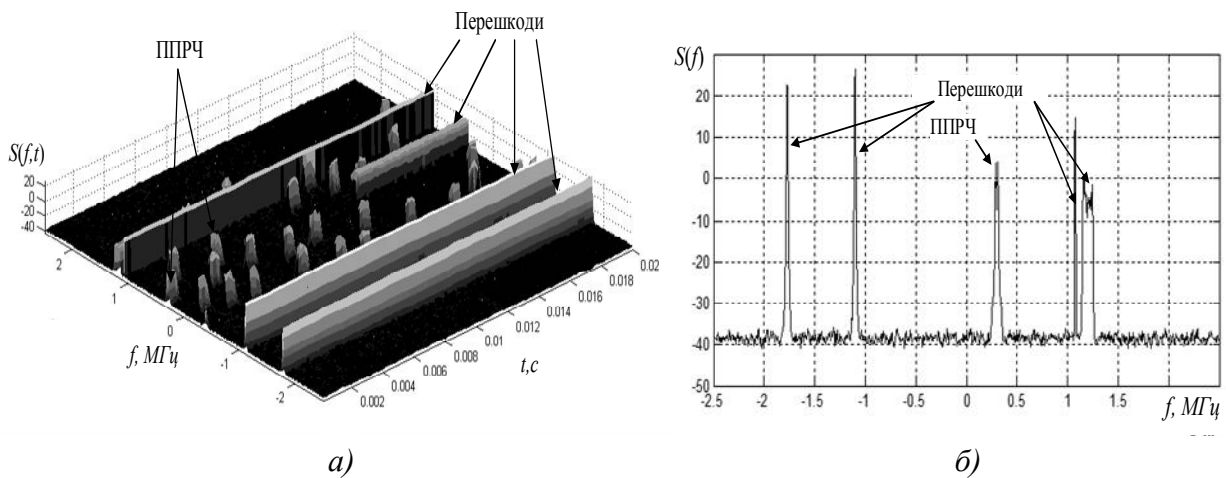


Рис. 1. Частотно-часове перетворення сигналу (а) та амплітудно-частотний спектр (АЧС) одного часового фрагмента (б)

З рис. 1 видно, що в сигнальній суміші присутній сигнал з ППРЧ, у частотній смузі якого знаходяться чотири вузькосмугові сигнали. Автоматичне визначення часових параметрів ППРЧ за таких умов ускладнене, оскільки ідентифікація частотних елементів ППРЧ може здійснюватися неправильно, що призведе до значних похибок при обчисленні параметрів. Для вирішення вказаної проблеми пропонуємо визначати часові параметри у два етапи:

виявлення вузькосмугових перешкод у смузі роботи телекомунікаційних систем із ППРЧ та розрахунок їх частотних параметрів;

режекторна фільтрація виявлених вузькосмугових перешкод та визначення часових параметрів ППРЧ.

На першому етапі знаходять вузькосмугові перешкоди, амплітуда спектральних гармонік в АЧС яких перевищує амплітуду спектральних гармонік сигналу з ППРЧ. Як показник для ідентифікації вузькосмугових перешкод використовують мінімальний час знаходження перешкоди на одній частоті t_v . Якщо значення t_v більше встановленого порога γt_v , то приймається рішення про наявність на даній частоті вузькосмугової перешкоди та визначається її центральна частота f_v і ширина спектра B_v [4]. Відповідно до отриманих значень формується режекторний фільтр, частотні характеристики якого відповідають параметрам перешкоди (центральна частота – $f_{RF} = f_v$; ширина смуги пропускання – $B_{RF} = B_v$).

Оскільки в частотній смузі сигналу з ППРЧ може знаходитися декілька випромінювань з різною амплітудою, то процес їх пошуку повторюється з використанням режекторних фільтрів, розрахованих на попередніх етапах. Для виявлення вузькосмугових перешкод, амплітуда спектральних складових яких близька за величиною, формується двомірний масив значень частот усіх спектральних піків, амплітуда яких перевищує встановлений пороговий рівень, а подальша ідентифікація вузькосмугових перешкод здійснюється шляхом аналізу даного масиву.

Забезпечення необхідної роздільної здатності та високих імовірностей правильного виявлення перешкод і правильного визначення параметрів за низьких відношень сигнал/шум (ВСШ) здійснюється шляхом вибору оптимальних параметрів частотно-часового перетворення.

Підвищення ймовірності правильного виявлення гармонік сигналу з ППРЧ реалізується за рахунок покращення якості АЧС (підвищення ВСШ АЧС та зменшення дисперсії шуму) шляхом збільшення розрядності ДПФ (для періодограми Уелча еквівалентно збільшенню ширини вікна) та завдяки більшій кількості вікон, що використовуються для усереднення спектральної потужності [6].

Перший підхід ґрунтується на тому, що ДПФ можна розглядати як смуговий фільтр, ширина головної пелюстки якого пропорційна розрядності перетворення. З підвищенням розрядності ДПФ N_{DFT} зменшується ширина смуги пропускання фільтра, знижується енергія шуму та покращується роздільна здатність за частотою [6].

Для дійсного вхідного сигналу ВСШ N_{DFT1} -мірного ДПФ підвищується порівняно із N_{DFT2} -мірним на таку величину [6]:

$$SNR_1 = SNR_2 + 20 \lg \left(\sqrt{\frac{N_{DFT1}}{N_{DFT2}}} \right). \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що збільшення розмірності ДПФ удвічі зумовлює покращення ВСШ на 3 дБ. Однак величина покращення ВСШ залежить від багатьох факторів (збігу гармонік сигналу з центрами бінів АЧС, виду випадкового шуму тощо), а це призводить до того, що величина підвищення ВСШ буде меншою, ніж (2).

Другою проблемою, що ускладнює підвищення ВСШ за рахунок збільшення розмірності ДПФ, є те, що кількість операцій множення при виконанні ДПФ пропорційна квадрату розмірності ДПФ N_{DFT}^2 .

Оскільки операції додавання виконуються простіше та швидше, ніж операції множення, то доцільно покращити якість АЧС шляхом усереднення декількох ДПФ. При цьому дисперсія шуму зменшується [6]:

$$\frac{\sigma_{KDFT}^2}{\sigma_{1DFT}^2} = \frac{1}{K_{DFT}}, \quad (3)$$

де K_{DFT} – кількість ДПФ, що усереднюються.

Для найбільш розповсюджених вагових вікон при використанні перекриття на 50% чи менше вираз (3) залишається справедливим [6].

Доцільність застосування декількох усереднених АЧС, розрахованих з використанням ДПФ меншої розмірності, замість одного АЧС із використанням ДПФ більшої розмірності, обумовлена такими особливостями:

усереднений АЧС має меншу дисперсію шуму;

при його розрахунку необхідна менша кількість розрахункових операцій;

він має меншу кількість спектральних піків, що спрощує процес їх пошуку та аналізу на факт належності до сигналів сторонніх вузькосмугових випромінювань.

Таким чином, для забезпечення високої ймовірності правильного виявлення гармонік в АЧС сигналу доцільно застосовувати перетворення Уелча з 50% перекриттям вагових вікон та з максимально можливою їх кількістю.

Параметри віконних перетворень (довжина вагового вікна та крок його зсуву) розраховуються до початку процесу визначення часових параметрів ППРЧ та відрізняються для етапів пошуку сторонніх випромінювань і визначення часових параметрів.

При пошуку сторонніх випромінювань мінімальна довжина вікна періодограми N_{w1} визначається величиною необхідної роздільної здатності за частотою, а крок зсуву вікна N_{p1} – вимогами до забезпечення часового критерію виявлення вузькосмугових перешкод:

$$N_{w1} \geq \frac{F_s}{\Delta F_{v1}}; \quad (4)$$

$$N_{p1} \leq \frac{t_v}{K_v} F_s, \quad (5)$$

де ΔF_{v1} – необхідна роздільна здатність за частотою, Гц;

K_v – кількість віконних перетворень, за результатами аналізу яких виявляються гармоніки сторонніх випромінювань.

При обчисленні часових параметрів ППРЧ мінімальна тривалість вікна періодограми N_{w2} визначається величиною необхідної роздільної здатності за частотою ΔF_{v2} згідно з виразом (4), а крок взяття відліків N_{p2} – заданою похибкою розрахунку тривалості частотного елемента:

$$N_{p2} \leq \Delta T_H F_s, \quad (6)$$

де ΔT_H – абсолютна похибка визначення тривалості частотного елемента, с.

Розрахунок тривалості частотних елементів здійснюється на основі аналізу похідної від частоти гармонік з максимальною амплітудою частотно-часового перетворення.

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

$$f_m[i] = \arg \left(\max_k (P_w[i, k]) \right), \quad (7)$$

де $P_w[i, k]$, $i = 1 \dots N_r$; $k = 1 \dots N_{w2}$ – АЧС, розрахований методом періодограми Уелча;
 N_r – кількість періодограм.

Розраховується похідна від частоти $f_m[i]$:

$$df_m[i] = |f_m[i+1] - f_m[i]|. \quad (8)$$

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

$$i_m[n] = \underset{df_m > \eta df_m}{Peak} (df_m[i]), \quad (9)$$

де $Peak(\cdot)$ – функція пошуку піків похідної df_m , що перевищують поріг ηdf_m .

Розраховуються значення поточних тривалостей частотних елементів:

$$T_{Hi}[n] = N_{p2} F_s (i_m[n+1] - i_m[n]). \quad (10)$$

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

$$T_H = \sum_{n=1}^{N_T} \frac{T_{Hi}[n]}{N_T}, \quad (11)$$

де N_T – кількість елементів масиву $T_{Hi}[n]$.

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

Для підвищення точності розрахунку T_H із масиву $T_{Hi}[n]$ перед обчисленням (11) видаляють аномальні значення, які виникають за рахунок хибної ідентифікації гармонік АЧС. Алгоритм виявлення аномальних значень у масиві $T_{Hi}[n]$ подано нижче.

Таким чином, схему методу автоматичного визначення часових параметрів ППРЧ можна зобразити у вигляді, наведеному на рис. 2.

Вхідними даними є масив комплексних відліків $r[i]$ з частотою дискретизації F_s . Першою операцією є розрахунок параметрів частотно-часових перетворень (блок 2).



Рис. 2. Схема методу визначення часових параметрів сигналів із ППРЧ на фоні вузькосмугових перешкод

Далі формується цикл (блоки 3–10), у якому з масиву $r[i]$ через інтервали N_{p1} зчитується масив відліків сигналу розмірністю N_{w1} , розраховуються періодограми Уелча та визначаються частоти спектральних гармонік із максимальною амплітудою $f_{Gm}[i]$. Якщо на етапі попередніх ітерацій сформовано масиви параметрів режекторних фільтрів $f_{RF}[i]$, $B_{RF}[i]$, то їх використовують для формування нулів у відповідних смугах АЧС (блок 6).

При аналізі елементів масиву $f_{Gm}[i]$ відповідно до часового критерію виявляють частоти сторонніх вузькосмугових випромінювань, визначають їх параметри та заносять до масивів параметрів режекторних фільтрів $f_{RF}[i]$, $B_{RF}[i]$.

Формується другий цикл (блоки 11–15), у якому з масиву $r[i]$ через інтервали N_{p2} зчитується масив відліків сигналу розмірністю N_{w2} , розраховуються періодограми Уелча, здійснюється режекторна фільтрація перешкод, пошук гармонік, що відповідають частотним елементам ППРЧ, та формується масив $f_m[i]$. Далі відповідно до виразів (8)–(11) розраховуються часові параметри радіосигналу з ППРЧ (блоки 16–18).

Виявлення та усунення хибно визначених значень тривалостей частотних елементів (блок 17) реалізується за алгоритмом виявлення аномальних значень, що ґрунтується на пошуку множини величин із масиву $T_{Hi}[i]$, середньоквадратичне відхилення (СКВ) яких не перевищує встановленого порога. Блок-схему алгоритму наведено на рис. 3.

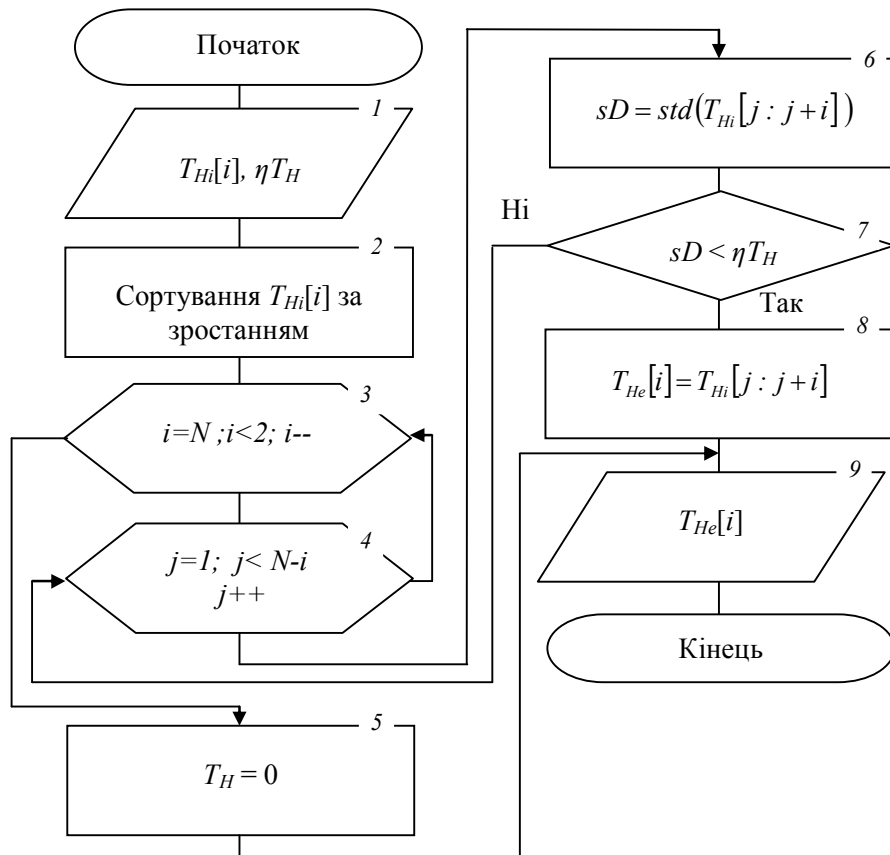


Рис. 3. Блок-схема алгоритму виявлення та усунення аномальних значень тривалостей частотних елементів

Першою операцією алгоритму (блок 2) є сортування масиву тривалостей за зростанням. Далі виконуються два цикли, у процесі яких вибираються дані з відсортованого масиву та розраховуються СКВ (блоки 3, 4, 6). Якщо СКВ менше встановленого порога ηT_H , то приймається рішення про відсутність аномальних вимірів (блок 7), до вихідного масиву заносяться значення поточної множини даних, за якими розраховувалося СКВ (блок 8), та виконання циклів завершується. В іншому разі тривалості присвоюється нульове значення (блок 5).

Верифікація розробленого методу здійснена шляхом його реалізації та проведення статистичних випробувань у програмному середовищі MATLAB. Сигнал з ППРЧ формувалася шляхом псевдовипадкового перестроювання двопозиційного частотно-

маніпульованого сигналу із швидкістю маніпуляції від 1000 біт/с до 15000 біт/с. Тривалість частотних елементів змінювалася в межах 1–20 мс. До вхідного сигналу додався білий гаусівський шум для забезпечення ВСШ від -25 дБ до 0 дБ та додавалися сигнали вузькосмугових перешкод (сигнали з частотною модуляцією, частотною та фазовою маніпуляціями, гармонічні коливання). Отримана сигнальна суміш використовувалася для дослідження розробленого методу. Для кожного зі значень ВСШ здійснювалося 500 розрахунків часових параметрів сигналу, результати яких усереднювалися. Результати статистичних випробувань у вигляді значень імовірності правильного визначення тривалості частотних елементів залежно від ВСШ наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Імовірності правильного визначення тривалості частотних елементів

ВСШ, дБ	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18
Імовірність	0,03	0,23	0,63	0,96	0,99	1	1	1

З табл. 1 випливає, що розроблений метод дозволяє визначати часові параметри сигналів з ППРЧ на фоні вузькосмугових перешкод з імовірністю, близькою до 1 при ВСШ від -21 дБ.

Висновок. Розроблений метод автоматичного визначення часових параметрів радіосигналів з ППРЧ на фоні вузькосмугових перешкод ґрунтується на аналізі двомірного розподілу енергії сигнальної суміші, отриманого з використанням віконної модифікованої періодограми Уелча, що забезпечує порівняно низьку дисперсію спектральних оцінок. Розділення процесу аналізу сигналу на декілька етапів дозволило виявити та видалити з розрахунків сторонні вузькосмугові випромінювання, а застосування алгоритму виявлення аномальних значень – відфільтрувати хибно визначені тривалості частотних елементів. Проведені статистичні випробування підтвердили працездатність методу та показали, що він забезпечує визначення часових параметрів ППРЧ із імовірністю, близькою до 1 при ВСШ від -21 дБ. Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на визначення часових параметрів декількох радіосигналів із ППРЧ, що передаються в одному частотному діапазоні, а також на розроблення підходів до автоматичного формування порогів виявлення гармонік, які відповідають стороннім випромінюванням та стрибкам ППРЧ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Горячая линия-Телеком, 2010. 624 с.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев и др. Москва : Радио и связь, 2003. 640 с.
3. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : Монография. Санкт-Петербург : Свое изд-во, 2013. 166 с.
4. Современные зарубежные тактические устройства: портативные радиостанции. URL: <https://trcvr.ru/2016/02/17/современные-зарубежные-тактические>.

5. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический поход. 2-е изд.; пер. с англ. Москва : Изд. дом «Вильямс», 2008. 992 с.
6. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд.; пер с англ. Москва : ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
7. Kanaa A., Zuri Sha'ameri A. A robust parameter estimation of FHSS signals using time-frequency analysis in a non-cooperative environment // *Physical Communication*. 2018. № 26. P. 9–20.
8. Li T., Tang Y., Lv Y. Parameter estimation of FH signals based on STFT and music algorithm // *Computer Application and System Modeling*. 2010. P. 84–96.
9. 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, California. Naval Postgraduate School, 1997. 114 p.
10. Hosseini S. N., Razavi H. Joint detection and hop parameters estimation of slow FHSS/MFSK signals using DHWT-AC technique in Rayleigh block fading channels // *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. Hong Kong, 2009. P. 55–59.
11. Chevva L., Sagar G. V. R. FH signal interception based on the time-frequency spectrogram by image enhancement techniques // *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2012. Vol. 2, Issue 2. P. 687–692.
12. Draganic A., Orovic I., Stankovic S. FHSS signal characterization based on the crossterms free time-frequency distributions // *2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing*. Budva, 2013. P. 443–447.
13. Jaiswal K. Spectral sensing for cognitive radio: detection and estimation of adaptive frequency hopping signal // *NCC 2009*. IIT Guwahati. 2009. P. 224–228.
14. Angelosante D., Giannakis G., Sidiropoulos N. Estimating multiple frequency-hopping signal parameters via sparse linear regression // *IEEE transactions on signal processing*. 2010. Vol. 58, № 10. P. 5044–5056.
15. Kuo-Ching Fu, Yung-Fang Chen. Robust blind frequency and transition time estimation for frequency hopping systems // *EURASIP journal on advances in signal processing*. Hindawi Publishing Corporation, 2010. P. 113–125.
16. Qin Y., Lv M. A new method of parameter estimation of frequency-hopping signal // *2nd International Conference on Information, Electronics and Computer*. 2014. P. 138–141.
17. Barbarossa S. Scaglione A. Parameter estimation of spread spectrum frequency-hopping signals using time-frequency distributions. Rome, 1998. P. 304–308.
18. Fan H., Guo Y., Feng X. Blind parameter estimation of frequency hopping signals based on matching pursuit // *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Dalian, 2008. P. 112–123.

Подано 22.05.2018

А. А. Нагорнюк

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ НА ФОНЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

В статье предложен метод автоматического определения продолжительности частотных элементов радиосигнала с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и времени начала первого прыжка при наличии узкополосных помех в частотном

диапазоне работы соответствующей телекоммуникационной системы. Метод основан на анализе частотно-временного распределения, полученного с использованием оконного преобразования Уэлча, и состоит из двух этапов: выявления узкополосных помех и определения временных параметров псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Выявление узкополосных помех реализуется по временному критерию с использованием итерационного подхода. На основе определенных частотных параметров помех формируются режекторные фильтры, центральные частоты которых равны центральным частотам помех, а ширина полосы пропускания каждого из них – ширине их спектра. Определение временных параметров псевдослучайной перестройки рабочей частоты осуществляется путем расчета и анализа частотно-временного распределения сигнала с учетом характеристик режекторных фильтров. Для повышения точности вычисления временных параметров разработан алгоритм обнаружения аномальных значений в массиве рассчитанных длительностей частотных элементов на основе статистического критерия минимальной дисперсии. Приведены результаты исследования разработанного метода при отношении сигнал/шум от -25 дБ.

Ключевые слова: радиосигнал, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, параметр, частотный элемент, помеха, автоматизация, частотно-временное распределения, периодограмма.

O. A. Nahorniuk

METHOD OF AUTOMATIC TIME PARAMETERS ESTIMATION OF RADIO SIGNALS WITH FREQUENCY-HOPPING SPREAD SPECTRUM AGAINST THE BACKGROUND OF NARROW-BAND INTERFERENCES

Method of automatic estimation of frequency elements durations of radio signal with frequency-hopping spread spectrum and the start time of the first frequency-hopping spread spectrum hop in the case of narrowband interferences presence in the frequency range of frequency-hopping spread spectrum telecommunication system 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 two steps: the detection of narrowband interferences and the estimation of frequency-hopping spread spectrum time parameters. The detection of narrowband interferences is realized by the time criterion on the basis of the iterative approach. The rejection filters are formed on the basis of estimated frequency parameters of the interferences, whose central frequencies are equal to central frequencies of the interferences, and bandwidth - their spectrum bandwidth. frequency-hopping spread spectrum time parameters estimation is performed by calculating and analyzing the time-frequency distribution of the signal, taking into account the characteristics of the rejector filters. An algorithm for detecting anomalous values in an array of calculated frequency elements durations on the basis of the statistical criterion of minimum variance is developed to improve the accuracy of time parameters estimation. The results of developed method verification with a signal-to-noise ratio from -25 dB are presented.

Keywords: radio signal, frequency-hopping spread spectrum, parameter, frequency element, interference, automation, frequency-time distribution, periodogram.