

УДК 621.391

О.В. Кривенко

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ*

## МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ В РАДІОЗАСОБАХ З ППРЧ В УМОВАХ ВПЛИВУ НАВМИСНИХ ШУМОВИХ ЗАВАД

*Запропоновано методику формування сигналу в радіозасобах з ППРЧ, що дозволяє підвищити завадостійкість радіоліній з ППРЧ в умовах навмисних шумових завад. Сутність методики полягає у виборі необхідної ширини смуги сигналу ППРЧ (хопсету), при якій забезпечується задана якість передачі інформації.*

**Ключові слова:** засоби радіозв'язку, радіолінія, завадозахищеність, псевдовипадкова перестройка робочої частоти, хопсет, шумова загороджувальна завада, шумова завада в частині смуги.

### Вступ

Однією з найважливіших вимог до військових систем та засобів радіозв'язку є здатність успішно функціонувати в умовах впливу навмисних завад противника. Ефективним методом підвищення завадозахищеності, який знаходить широке застосування у військовій техніці радіозв'язку, є псевдовипадкова перестройка робочої частоти (ППРЧ) [1–4].

У статті [4] було проведено аналіз систем радіозв'язку з ППРЧ та визначено напрямки їх удосконалення. Однією з найбільш небезпечних для радіоліній з ППРЧ є завада у відповідь, тому в [5] запропоновано методику формування сигналу у радіозасобах з ППРЧ в умовах впливу вказаного виду завад, яка дозволяє підвищити завадозахищеність засобів радіозв'язку (ЗРЗ) при передачі мови.

Якщо постановник завад не може забезпечити достатній рівень подавлення радіолінії з ППРЧ з використанням завад у відповідь (через велику відстань до ЗРЗ, високу швидкість стрибків частоти радіолінії тощо), іншою ефективною його стратегією може бути створення шумових завад – загороджувальної та у частині смуги.

При впливі шумової завади в частині смуги (ШЗЧС) у разі унеможливлення передачі інформації через перевищення допустимого значення ймовірності помилкового приймання в системі радіозв'язку (СРЗ) доцільно збільшувати ширину хопсету – смуги частот, у межах якої здійснюється перестройка робочої частоти [4]. При цьому, противник може розширювати спектр завади, і при повному перекритті хопсету вона перетвориться у шумову загороджувальну заваду (ШЗЗ). Якщо у станції завад (СЗ) вичерпані енергетичні можливості, вона не може створити заваду з необхідною спектральною щільністю потужності (СЩП) і не здатна подавити радіолінію.

**Формулювання мети статті.** У сучасних ЗРЗ з ППРЧ, наприклад, RF-7850M-НН виробництва компанії „Harris” [6], розширення хопсету можливо реалізувати за допомогою оператора, тому він повинен бути достатньо підготовленим і вміти здійснювати

відповідні налаштування радіостанції. Іншим способом, який не вимагає високої кваліфікації оператора, є створення запасних каналів з хопсетами у інших ділянках робочого діапазону частот, а також з хопсетами з більшою шириною. В обох випадках організаційно (на рівні інструкцій операторам радіостанцій) повинен бути визначений порядок входження в зв'язок у випадку впливу засобів радіоелектронного подавлення (РЕП).

Слід зауважити, що зі збільшенням ширини хопсету погіршується якість зв'язку [1], що обумовлено наступними основними чинниками:

закони поширення радіохвиль відрізняються для різних частотних елементів, і ця різниця тим більше, чим далі вони рознесені по частотній осі;

чим більший діапазон частот ЗРЗ (хопсет), тим більше у його межах відрізняються електричні характеристики антени (коефіцієнт підсилення, коефіцієнт стоячої хвилі та ін.).

Крім цього, більші значення ширини хопсету призводять до зростання ймовірності виникнення взаємних завад з іншими радіоелектронними засобами (РЕЗ), у тому числі військового призначення. Для зменшення взаємних завад необхідно здійснювати ретельні розрахунки на етапі планування зв'язку та створення конфігураційних файлів для налаштування радіостанцій.

Таким чином, можна стверджувати, що рівень адаптації параметрів існуючих ЗРЗ з ППРЧ до завадової обстановки в каналі є недостатнім та не дозволяє максимально ефективно використовувати можливість по збільшенню дальності зв'язку або пропускну спроможності при забезпеченні заданого рівня якості передачі інформації.

Тому **метою статті** є розробка методики формування сигналу ППРЧ у військових засобах радіозв'язку для підвищення завадостійкості в умовах впливу навмисних шумових завад (загороджувальної та у частині смуги).

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо основні математичні співвідношення, використані в методиці.

Моделлю ШЗЗ, що впливає на СРЗ з ППРЧ (рис. 1, а), є обмежений у смузі адитивний білий гаусівський шум зі спектральною щільністю потужності  $G_3$

$$G_3 = P_3 / \Delta f_{hs}, \quad (1)$$

де  $P_3$  – потужність завади;  $\Delta f_{hs}$  – ширина хопсету. Спектральна щільність потужності ШЗЗС (рис. 1, б) може бути представлена у вигляді двох рівнів [1–2]:

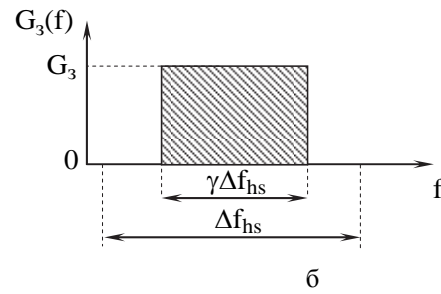
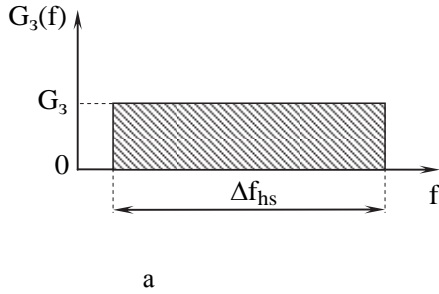


Рис. 1. Представлення шумової завади: а – загороджувальна; б – в частині смуги

Як впливає з виразу (2), спектральна щільність потужності ШЗЗС зростає в  $1/\gamma$  разів у порівнянні зі спектральною щільністю потужності ШЗЗ (1). Станція постановки шумових завод з рівномірно розподіленою потужністю в межах смуги  $\gamma\Delta f_{hs}$  подавляє частотні елементи сигналу.

З метою підвищення ефективності системи РЕП, спектр шумової завади в частині смуги може стрибкоподібно за випадковим законом переміщуватися по всьому діапазону частот СРЗ.

Графіки залежності  $P_6 = f(Q^2)$ , де  $Q^2$  – відношення сигнал/завада, для випадку, коли СРЗ використовує некогерентну двійкову частотну модуляцію (ЧМ-2) для різних значень  $\gamma$ , за умови, що представлена на рис. 2 [1]. В табл. 1 наведено відповідні значення  $\gamma$ . Завадостійкість некогерентної ЧМ-2, визначається виразом, спрощеним з урахуванням того, що у більшості випадків постановки навмисних завод справедливим є припущення  $G_3 \gg G_0$ , де  $G_0$  – спектральна щільність потужності шуму в каналі [1; 7]:

$$P_6 = \gamma \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}Q^2}, \quad (3)$$

де  $Q^2 = \frac{E}{G_3} = \frac{P_c}{G_3 \cdot \frac{1}{\tau_i}}$ ;  $P_c = \frac{E}{\tau_i}$  – потужність сигналу;

$E$  – енергія сигналу;  $\tau_i$  – тривалість інформаційного символу;  $\tau_i = 1/v_i$ ,  $v_i$  – швидкість передачі інформації.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів перекриття спектру

$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	$\gamma_7$	$\gamma_8$	$\gamma_9$	$\gamma_{10}$
0,0001	0,0005	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,3	0,5	1

$$G_3 = \begin{cases} \frac{P_3}{\gamma\Delta f_{hs}} & \text{в смузі } \gamma\Delta f_{hs}; \\ 0 & \text{в смузі } (1-\gamma)\Delta f_{hs}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\gamma = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_{hs}}$  – коефіцієнт, що характеризує частину смуги сигналу, яку займає завада,  $0 \leq \gamma \leq 1$ .

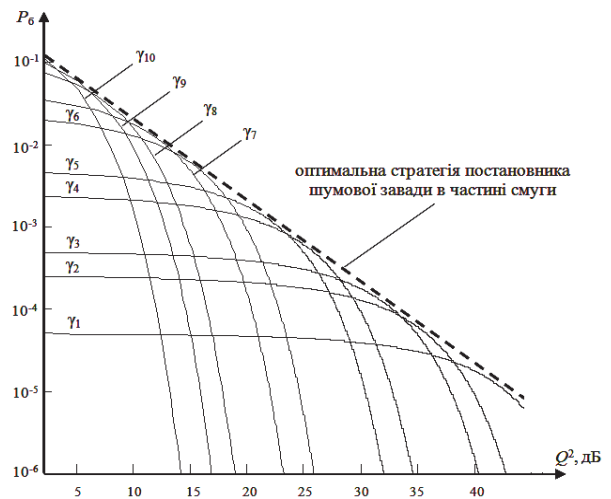


Рис. 2. Завадостійкість радіолінії з ППРЧ та ЧМ-2 при впливі ШЗЗ та ШЗЗС

При даній моделі завади для будь-якого співвідношення сигнал/завада має місце оптимальне значення частини, смуги частот, що подавляється  $\gamma_{opt}$  (забезпечується станцією завод шляхом вибору необхідного значення ширини спектра завади  $\Delta f_3$ ), при якій завадостійкість СРЗ буде мінімальною. Завада з такими параметрами є найгіршою для СРЗ [1–4].

У той же час, з погляду СРЗ можна стверджувати, що для фіксованої потужності завади  $P_3$  має місце оптимальне значення  $\gamma'_{opt}$  (забезпечується шляхом вибору необхідної ширини хопсету  $\Delta f_{hs}$ ), при якому завадостійкість СРЗ буде мінімальною необхідною (достатньою), наприклад,  $10^{-6}$  для передачі даних [8].

**Сутність методики** полягає у виборі такої ширини хопсету, при якій забезпечується необхідний рівень завадостійкості радіолінії з ППРЧ в умовах навмисних шумових завод (загороджувальної та у частині смуги).

**Вихідні дані:** режим роботи СРЗ – ППРЧ; параметри засобів радіозв'язку і навмисних завад  $\Psi = \{\psi_i\}$ , де  $\psi_i$  – потужність передавача, вид модуляції (ЧМ-2), швидкість передачі інформації (необхідна пропускна спроможність), максимальна ширина хопсету –  $\Delta f_{\max}$ , яка відповідає діапазону робочих частот радіостанції; мінімальна ширина хопсету –  $\Delta f_{\min}$ ; крок зміни ширини хопсету, тип навмисної завади – шумова (загороджувальна або у частині смуги, що характеризуються шириною спектра  $\Delta f_3$  та коефіцієнтом перекриття хопсету –  $\gamma$ , спектральною щільністю потужності  $G_3$ ).

**Обмеження:** постановник завад використовує тільки шумові завади (загороджувальну або у частині смуги); в каналі за відсутності навмисних завад забезпечується ймовірність помилкового приймання сигналів  $P_6 \leq 10^{-6}$ ; завадостійке кодування та каналне перемежування сигналу в роботі не розглядаються, передбачається, що отримані результати дають виґраш додатково до них.

**Допущення:** пристрій оцінювання стану каналу дозволяє ідентифікувати наявність шумових завад у каналі зв'язку та визначити їх параметри (спектральну щільність потужності  $G_3$ , ширину спектра  $\Delta f_3$  та, відповідно, коефіцієнт перекриття  $\gamma$ ); в процесі ведення зв'язку радіозасоби мають канал зворотного зв'язку, яким передається необхідна інформація для управління вибором значень параметрів сигналу ППРЧ.

**Необхідно:** забезпечити необхідну якість передачі інформації ( $P_6 \leq P_{6, \text{доп}}$ ) шляхом вибору мінімальної необхідної ширини хопсету:

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{hs}} \rightarrow \min; \\ P_6 = \frac{\Delta f_3}{\Delta f_{\text{hs}}} \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2} Q^2} \leq P_{6, \text{доп}}. \end{cases} \quad (4)$$

Методика формування сигналу радіозасобів з ППРЧ при передачі мови в умовах навмисних шумових завад, алгоритм реалізації якої представлений на рис. 2, складається з наступних етапів.

1. *Введення вихідних даних (блок 1 на рис. 2).* Вводяться параметри ЗРЗ та навмисних завад  $\Psi = \{\psi_i\}$ , а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{6, \text{доп}}$ .

2. *Встановлення зв'язку (блоки 2, 3 на рис. 2).* Один з кореспондентів радіомережі виходить на передачу та ініціює сеанс зв'язку. Сеанс може розпочинатися з будь-якими значеннями мінімальної та максимальної частот хопсету ( $f_{\min}$  та  $f_{\max}$ ) та, відповідно, ширини хопсету ( $\Delta f_{\text{hs}}$ ), в залежності від обраного оператора каналу та його попередніх налаштувань.

3. *Оцінка завадової обстановки в каналі зв'язку (блок 4 на рис. 2).*

В процесі встановлення зв'язку на радіолінії оцінюється сигнальна й завадова обстановка в каналі. Тому одним з основних завдань при проектуванні систем і засобів радіозв'язку є вибір придатного

алгоритму оцінювання стану каналу зв'язку, детальний аналіз яких проведено в статті [8].

У випадку дії в каналі шумової завади необхідно визначити її ширину  $\Delta f_3$ , спектральну щільність потужності  $G_3$ , коефіцієнт перекриття  $\gamma$ . Радіостанціями на прийомі здійснюється ідентифікація шумових завад за допомогою прямих методів оцінювання стану каналу (за рахунок різкого збільшення усередненого рівня прийнятого сигналу на ділянці діапазону робочих частот радіолінії порівняно з усередненим рівнем іншої частини діапазону) [8].

Знаючи характеристики завади з виразу (4) можна визначити мінімально необхідну ширину хопсету  $\Delta f_{\text{hs}}$  для забезпечення оптимального для СРЗ коефіцієнта перекриття  $\gamma'_{\text{opt}}$ .

В моменти пауз в інформаційному обміні, а також на етапі встановлення зв'язку можлива передача тестової послідовності для безпосереднього визначення  $P_6$ .

4. *Вибір необхідної ширини хопсету (блоки 6-9 на рис. 2).*

4.1. Якщо  $P_6 > P_{6, \text{доп}}$ , то для усунення впливу завади необхідно збільшити ширину хопсету на мінімально необхідну величину (щоб отримати  $P_6 \leq P_{6, \text{доп}}$ ).

4.2. Якщо пристрій оцінки каналу виявляє шумову заваду, але її СЦП у заданому інтервалі частот недостатня ( $P_6 < P_{6, \text{доп}}$ ), то ширина хопсету зменшується до допустимого значення.

5. *Ведення зв'язку (блоки 10-11 на рис. 2).* В процесі ведення сеансу зв'язку аж до його закінчення значення  $\gamma$  контролюється за допомогою пристрою оцінювання каналу зв'язку (блок 4). Якщо один з об'єктів (радіостанції або постановники завад) перебувають у русі, або станція завад почала працювати більш ефективно (значення  $P_3$  зростає), наприклад, після того, як замість декількох цілей (радіомереж) зосередилась на одній, або менш ефективно (у зворотній ситуації), необхідно змінювати відповідним чином ширину хопсету (блоки 6-9).

Якщо навіть при максимальній ширині хопсету не може бути забезпечена необхідна завадостійкість (блок 6), необхідно змінювати вихідні дані (збільшувати потужність, змінювати діаграму направленості антени, зменшувати інформаційну швидкість тощо) (блок 2).

## Висновки

Таким чином, у статті запропоновано методику формування сигналу у військових радіозасобах з ППРЧ, що дозволяє підвищити завадозахисність радіолінії в умовах впливу навмисних шумових завад та зменшити рівень взаємних завад з іншими радіоелектронними засобами та системами.

Наукова новизна представленої методики полягає у введенні при формуванні сигналу ППРЧ військових засобів радіозв'язку в умовах шумових завад процеду-

ри автоматичного вибору мінімально необхідної ширини смуги частот сигналу (хопсету), при якій забезпечується заданий рівень якості передачі інформації.

Напрямок подальших досліджень є моделювання роботи радіоліній з ППРЧ з використанням розробленої методики в умовах навмисних шумових завад.

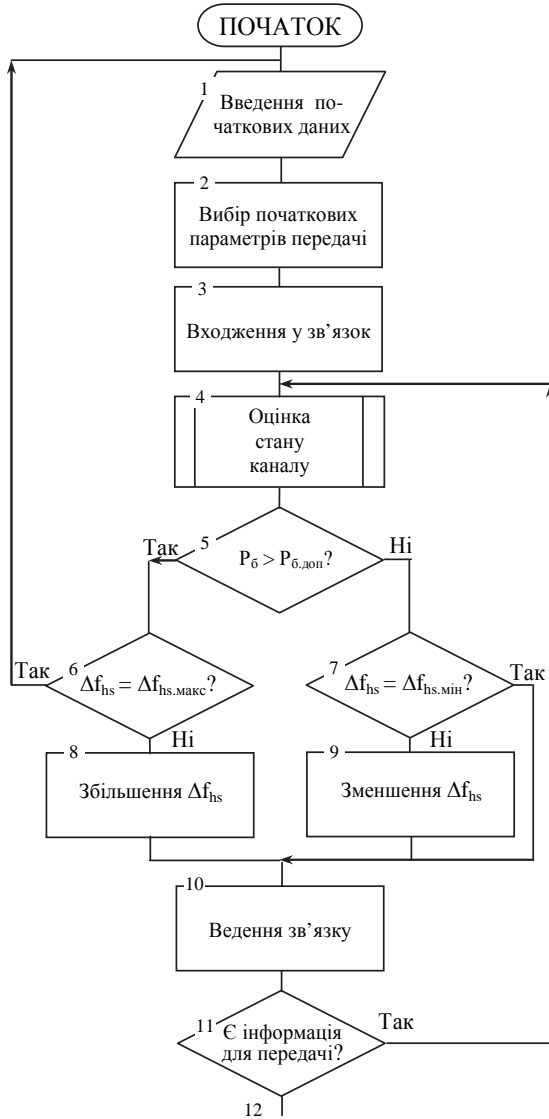


Рис. 2. Блок-схема алгоритму реалізації методики

### Список літератури

1. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналом методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев – М.: Радиософт, 2008. – 512 с.
2. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: Радиософт, 2008. – 260 с.
3. Макаренко С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
4. Напряжки вдосконалення засобів радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти / [Т.Г. Гурський, О.Г. Жук, О.В. Кривенко, А.В. Шишацький] // Збірник наукових праць ВІПІ, 2016. – Вип. 1. – С. 25-34.
5. Гурський Т.Г. Методика формування сигналу в радіозасобах з ППРЧ при передачі мови в умовах впливу завад у відповідь / Т.Г. Гурський, О.В. Кривенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – Вип. 2 (42). – С. 179-184.
6. RF-7850M-HH. Multiband Networking Handheld Radio. Operations Manual – Harris Corporation, RF Communications Division, New York, 2014. – 237 p.
7. Теорія електричного зв'язку. Ч. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації: підручн. / [О.В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, О.П. Лежнюк та ін.]. – К.: ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2008. – 286 с.
8. Investigating communication architecture for tactical radio networks design / [B. Suman, S.C. Sharma, M. Pant, S. Kumar] // International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences. – 2012. – Vol. 2. – Issue 2. – P. 106-118.
9. Толюпа С.В. Аналіз методів оцінювання параметрів багатопроменевих каналів зв'язку / С.В. Толюпа, Т.Г. Гурський, О.І. Восколович // Вісник ДУІКТ. – 2011. – Т. 9 (3). – С. 194-204.

Надійшла до редколегії 14.12.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. І.О. Романенко, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

### МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА В РАДИОСРЕДСТВАХ С ППРЧ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

А.В. Кривенко

Предложена методика формирования сигнала в радиосредствах с ППРЧ, что позволяет повысить помехоустойчивость радиолиний с ППРЧ в условиях преднамеренных шумовых помех. Сущность методики заключается в выборе необходимой ширины полосы сигнала ППРЧ (хопсета), при которой обеспечивается заданное качество передачи информации.

**Ключевые слова:** средства радиосвязи, радиолиния, помехозащищенность, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, хопсет, шумовая заградительная помеха, шумовая помеха в части полосы.

### METHOD OF FORMING SIGNAL IN RADIO FACILITIES WITH FHSS IN CONDITIONS OF INFLUENCE OF INTENTIONAL NOISE INTERFERENCES

A. Krivenko

Method of signal forming in radio facilities with FHSS, which allow to improve the noise immunity of radio links with FHSS in conditions of intentional noise interference. Essence of the technique is to select the necessary bandwidth of the FHSS (hopset) signal, at which providing the given quality of information transmission.

**Keywords:** radio facilities, radio line, noise immunity, frequency hopping spread spectrum, hopset, noise interferences, noise interference in part of the band.