

УДК 621.391

А.В. Шишацький<sup>1</sup>, О.В. Кувшинов<sup>2</sup>, С.П. Петрунчак<sup>3</sup><sup>1</sup> ЦНДІ озброєння та військової техніки ЗС України, Київ<sup>2</sup> Управління нормативно-методичного забезпечення та моніторингу володіння, використання та розпорядження нерухомого майна і земель, Київ<sup>3</sup> Оперативне командування "Північ", Чернігів

## МЕТОДИКА ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОАНТЕННИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПЕРЕСТРОЙКОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

У статті запропоновано удосконалену методику вибору раціональних значень параметрів багатоантенних систем військового радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти в залежності від сигнально-завадової обстановки. Зазначена методика дозволяє здійснювати прогнозування сигнально-завадової обстановки, обирати найбільш придатні робочі частоти, а також дозволяє не тільки змінювати швидкість перестройки робочої частоти але й змінювати вид та тривалість розширювальної послідовності, а також початкове заповнення формуючого поліному.

**Ключові слова:** псевдовипадкова перестройка робочої частоти, сигнально-кодова конструкція, швидкість передачі інформації, ймовірність бітрової помилки, радіоелектронне подавлення, системи ММО, прогнозування, робочі частоти.

### Вступ

Сучасні системи військового радіозв'язку (СВРЗ) функціонують в складній радіоелектронній обстановці, яка характеризується наявністю в каналі зв'язку навмисних завад та завмирань сигналу. Однією з технологій, що дозволяють ефективно боротися з навмисними завадами та завмираннями сигналу, а також значно збільшити пропускну здатність радіоканалів є технологія „багато входів – багато виходів” (ММО – Multiple-Input Multiple-Output) [1–2].

У технології ММО об'єднані просторово-часові методи прийому з використанням адаптивних антен, методи просторово-часового кодування і просторово-часового розділення сигналів [1–2].

Перевагами технології ММО є:

- підвищення дальності роботи засобів радіозв'язку (ЗРЗ);
- наявність ефективних механізмів боротьби з завмираннями сигналів;
- підвищення пропускну здатності каналів зв'язку за допомогою формування рознесених каналів.

Іншим напрямком підвищення завадозахищеності та ефективності систем та засобів військового радіозв'язку є технологія псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ) [3, 4].

Для методу ППРЧ принцип боротьби з завадами полягає в розміщенні інформаційного сигналу з малою розмірністю в високорозмірному просторі сигналу. В таких умовах постановник завад повинен або розподіляти обмежену потужність завад по всьому простору радіосигналу, тим самим створюю-

вати малу спектральну щільність потужності завад, або використовувати всю потужність передавача завад в малому підпросторі, залишаючи частину простору радіосигналу вільною від завад. Для методу ППРЧ характерними недоліками є: низька швидкість передачі інформації та відсутність механізмів боротьби з завмираннями, що призводять до появи пакетів помилок у каналі зв'язку.

**Аналіз наукових публікацій**, проведений в [5] показав, що ППРЧ та пряме розширення спектру мають низьку спектральну ефективність  $\beta_F$ , і тому не мають перспективи використання в високошвидкісних комерційних системах радіодоступу. Але через високий рівень завадозахищеності ППРЧ широко використовується у військових ЗРЗ.

Використання ж технології ММО, що є ефективною в умовах багатоприменності, значно підвищує завадозахищеність у відносно невеликому частотному діапазоні.

З проведеного аналізу існуючих методів забезпечення завадозахищеності ЗРЗ можна зробити висновки, що перспективним напрямом вирішення цього завдання є застосування технології ММО з ППРЧ [6].

Проте наукові результати, що викладені в відомих публікаціях [1–6] мають ряд недоліків, а саме:

- відсутня можливість вибору робочих частот з урахуванням стратегії комплексів радіоелектронного подавлення (РЕП);
- відсутні погляди, щодо прогнозування сигнально-завадової обстановки;
- управління параметрами ППРЧ здійснюється

лише зміною швидкості перестройки робочої частоти (без зміни закону перестройки робочої частоти);

– вид та параметри псевдовипадкової послідовності в ході ведення сеансу радіозв'язку не змінюються.

Зазначені недоліки обумовлюють недостатню ефективність використання технологій МІМО з ППРЧ, обмежують дальність зв'язку, що робить її використання у СВРЗ досить обмеженим.

Тому **метою статті** є розробка методики вибору раціональних значень параметрів багатоантенних СВРЗ з ППРЧ.

## Виклад основного матеріалу

Методика вибору раціональних значень параметрів багатоантенних СВРЗ з ППРЧ, алгоритм реалізації якої наведений на рис. 1, складається з наступних етапів.

1. *Введення вихідних даних (дія 1 на рис. 1).* Вводяться параметри передавального пристрою і каналу зв'язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ , а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{\text{б доп}}$  та мінімально необхідної швидкості передачі інформації  $v_{\text{і доп}}$ .

2. *Оцінка стану каналу зв'язку (дія 2 на рис. 1).*

На даному етапі проводиться оцінювання стану каналу зв'язку за допомогою безеталонної методики оцінювання, що розроблена в [7].

3. *Прогнозування стану каналу зв'язку (дія 3 на рис. 1).*

На даному етапі відбувається прогнозування сигнально-завадової обстановки. Зазначена процедура відрізняється від відомих тим, що додатково містить операції:

- рециркуляції вхідних даних на один відлік;
- передискретизації вихідного процесу в логарифмічному масштабі часу;
- знаходження енергетичного спектру отриманого сигналу, визначенням відгуку;
- знаходження ентропії енергетичного спектру відповідної вибірки, що підлягає передискретизації,
- розрахунку максимального значення відгуків ентропії;
- знаходження прогнозу для реалізації максимального значення ентропії;
- передискретизації результату прогнозування в експотенційному масштабі часу.

Зазначена процедура має наступну послідовність дій [8]:

1. Відбувається введення вихідних даних.
2. Виконується часове стиснення процесу, який прогнозується, що необхідне для забезпечення об-

робки сигналів в режимі реального часу. При цьому на кожному кроці реалізація оновлюється на один відлік.

Таким чином, формується клас реалізацій, що відрізняється один від одного зсувами на один відлік. Для формування класу дискретних відліків кожна реалізація піддається операції логарифмування та дискретизації.

Далі здійснюється знаходження максимального значення ентропії в відповідності з відношенням:

$$H(f) = - \int_{-1/2}^{1/2} \ln \left[ \frac{X(f)}{\int_{-1/2}^{1/2} (X(f)) df} \right] df ,$$

де  $X_n(f) = \frac{X(f)}{\int_{-1/2}^{1/2} (X(f)) df}$  – нормований енергетич-

ний спектр вибірки,  $X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_{ss}(n) \exp(-2\pi fn)$ ,

$r_{ss}(n)$  – кореляційна функція процесу. Використання запропонованої процедури дозволяє отримати більш точний прогноз, чим при використанні інших відомих процедур.

4. *Вибір робочих частот з урахуванням стратегії засобів радіоелектронного подавлення (дія 4 на рис. 1).*

На підставі розробленого в роботах [9–11] науково-методичного апарату вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку проводиться аналіз радіочастотного ресурсу під час якого здійснюється визначення подавлених частотних діапазонів та стратегії комплексів радіоелектронного подавлення противника.

5. *Вибір режиму роботи системи МІМО (дія 5 на рис. 1).*

В залежності від значення відношення сигнал/шум в каналі, вибирається варіант передачі даних з використанням тільки потужних власних каналів та визначається граничне значення ВСЗ  $Q_{з гр}^2$ , яке визначається на етапі проектування і залежить від стану каналу та розмірності МІМО-системи.

Канали, в яких відношення сигнал/шум менше допустимого відключаються та здійснюється розподіл потужності сигналу між іншими каналами.

6. *Визначення відношення сигнал/шум (дія 6 на рис. 1).*

На даному етапі відбувається визначення відношення сигнал/шум. Якщо наявне значення перевищує допустиме, то відбувається корегування параметрів системи МІМО.

7. *Вибір режиму роботи ППРЧ (дія 7 на рис. 1).*

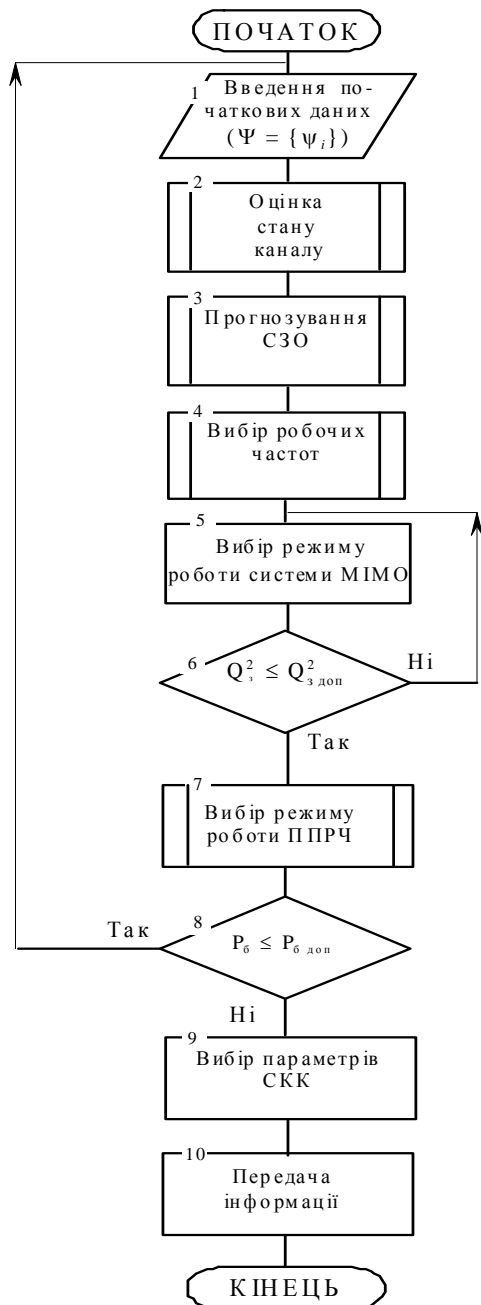


Рис. 1. Алгоритм реалізації методики вибору раціональних значень параметрів багатоантенних систем військового радіозв'язку з ППРЧ

При використанні ППРЧ для ЗРЗ однією із найнесприятливіших завад є завада у відповідь (ЗВ) (ретранслювана завада). Потужність передавача завад концентрується лише в смузі частот каналу радіостанції і тільки під час її роботи [1; 5]. Закінчення дії ретранслюваної завади повинно збігатися з моментом припинення випромінювання сигналів радіозасобу.

У перспективних станціях ретранслюваних завад УКХ діапазону, що використовують новітні технічні досягнення і швидкодіючу мікропроцесорну техніку в апаратурі РЕП, мінімальний час спрацювання  $\Delta t_{\text{спр min}}$  може складати десятки мікросекунд

і менше [5]. У цих умовах важливим параметром радіозасобу з ППРЧ (з погляду завадозахищеності) є фактичний час роботи на одній частоті  $\Delta t_p$ , Цей параметр, який визначає швидкість перестроювання частоти  $\nu_{\text{пер}}$ , характеризує можливість радіозасобу з ППРЧ „втікати” від впливу ретранслюваних завад.

Коефіцієнт перекриття сигналу ретранслюваною завадою залежить не тільки від часу спрацювання  $\Delta t_{\text{спр}}$ , але і від взаємного розташування (топології) передавача і приймача ЗРЗ, а також станції ретранслюваних завад на місцевості, що визначає час затримки завади  $\Delta t_z$ .

Ретранслювана завада є неефективною тільки при виконанні умови що час роботи радіозасобу на одній частоті  $\Delta t_p$  повинен бути менший, ніж сумарний час спрацювання  $\Delta t_{\text{спр}}$  і час запізнювання завади  $\Delta t_z$ , обумовленого розміщенням (топологією) на місцевості передавача і приймача ЗРЗ та станції ретранслюваних завад і кінцевою швидкістю поширення радіохвиль. У цьому випадку коефіцієнт  $\gamma = 0$ , а середня ймовірність помилки на біт  $P_0$  визначається тільки власними шумами приймача.

Алгоритм вибору режиму роботи ППРЧ складається з наступних етапів:

1. Визначення виду і характеристик навмисних завад.
2. Визначення коефіцієнту перекриття спектру.
3. Визначення типу та тривалості розширювальної послідовності;
4. Визначення швидкості перестроювання робочої частоти.
5. Перевірка коефіцієнту розширення спектру.
6. Перевірка швидкості перестроювання робочої частоти на предмет максимального значення.
7. Корегування коефіцієнту розширення спектру.
8. Зміна типу та тривалості псевдовипадкової послідовності.
8. Перевірка виконання вимог з завадозахищеності для кожного з режимів (дія 8 на рис. 1).

У разі відповідності стану каналу зв'язку параметрам, що задовольняють тому типу інформації, яка передається по каналу зв'язку, здійснюється передача пакету, якщо ні, здійснюється передача пакету та передається інформація про теперішній стан каналу зв'язку для корегування вибору режиму роботи ЗРЗ, що дозволить зменшити час прийняття рішення, щодо доцільності використання режиму роботи.

9. Вибір параметрів сигнально-кодових конструкцій (СКК) (дія 9 на рис. 1).

Алгоритм вибору СКК для кожного власного каналу складається з вибору, в залежності від зава-

дової обстановки, виду модуляції, вибору коректимального коду і вибору маніпуляційного коду.

*Вибір виду модуляції.* При створенні СКК широкій розвиток одержали методи двовимірної модуляції, при яких ансамблі сигналів можуть бути представлені крапками в двовимірному евклідовому просторі. Незважаючи на те, що теоретично при передачі інформації з каналу одномірні види модуляції мають такі ж потенційні можливості, що і двовимірні, при формуванні СКК одномірна модуляція використовується набагато рідше. Застосування багатомірних сигналів обмежується складністю реалізації таких СКК.

*Вибір коректуючого коду.* Важливим етапом побудови ефективних СКК є вибір методу захисту від помилок, що базуються на застосуванні завадостійких кодів [3; 12–13]. Використання цих кодів дозволяє отримати енергетичний вигравш кодування (ЕВК), який характеризує ступінь можливого зниження енергетики передачі при кодуванні в порівнянні з відсутністю кодування, якщо достовірність передачі в обох випадках однакова. Цей вигравш можна використовувати для поліпшення параметрів і характеристик багатьох важливих властивостей систем передачі даних, наприклад, для зменшення розмірів дуже дорогих антен, підвищення дальності зв'язку, збільшення швидкості передачі даних, зниження необхідної потужності передавача і т.д.

*Вибір маніпуляційного коду.* При узгодженні кодека двійкового завадостійкого коду і модему багатопозиційних сигналів, необхідно використовувати маніпуляційний код, при якому збільшенні відстані за Хеммінгом між кодовими комбінаціями відповідає більша відстань за Евклідом між сигналами.

Способи узгодження модуляції і кодування можна розділити на двох груп: узгодження оптимальним маніпуляційним кодом і узгодження на основі розбиття ансамблю на вкладені підансамблі.

СКК, що відносяться до першої групи, є результатом узгодження відомих двійкових завадостійких кодів із багатопозиційним ансамблем сигналів шляхом використання спеціальним чином підібраного маніпуляційного коду. Оскільки помилки найчастіше відбуваються за рахунок переходів в області сусідніх сигналів, то кодові комбінації, які відповідають сусіднім сигналам, повинні розрізнятися найменшою кількістю двійкових символів. Цій вимозі в ряді випадків задовольняє код Грея [5; 12].

Друга група включає досить велику кількість типів СКК, які розрізняються модифікаціями методів узгодження. Основою побудови СКК такого виду є розбиття ансамблю сигналів на вкладені підансамблі [5; 12]. Розбиття здійснюється таким чином, що підансамблі мають однакову кількість сигнальних точок. Відстані між сусідніми сигналами підансамблів однакові, а мінімальні відстані між сигналами

підансамблю збільшуються з кожним кроком розбиття.

## Висновки

1. В роботі запропоновано методику вибору раціональних значень параметрів багатоантенних систем військового радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти.

В запропонованій методиці, на відміну від відомих, в процесі вибору параметрів багатоантенних ВСПЗ здійснюється прогнозування сигнально-завадової обстановки, обираються найбільш придатні робочі частоти, змінюється вид та тривалість розширювальної послідовності, а також початкове заповнення формулюючого поліному.

Напрямок подальших досліджень є розробка методики управління параметрами багатоантенних ЗРЗ з ортогональним частотним мультиплексуванням в умовах впливу навмисних завад.

## Список літератури

1. Слюсар В. Системи МІМО: принципи побудови та обробка сигналів / В. Слюсар // *Електроніка: Наука, Технологія, Бізнес.* – 2005. – № 8. – С. 52-58.
2. Кувшинов О.В. Аналіз характеристик систем радіодоступу з технологією МІМО / О.В. Кувшинов, Д.А. Міночкін // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка.* – Вип. № 3. – К.: ВІКНУ, 2006. – С. 51-56.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты: *науч. посібн.* / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Завадостійкість каналів зв'язку / В.Д. Бабич, О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев. – К.: КВІУЗ, 2001. – 150 с.
5. Гурський Т.Г. Напрямки вдосконалення засобів радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти / Т.Г. Гурський, О.Г. Жук, О.В. Кривенко, А.В. Шишацький // *Збірник наукових праць ВІТІ,* 2016. – Вип. 1. – С. 25-34.
6. Восколович О.І. Методика управління параметрами радіозасобів МІМО з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти / О.І. Восколович // *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”.* – 2011. – Вип. 2 – С. 21-27.
7. Шишацький А.В. Удосконалена методика оцінювання параметрів сигналів з цифровими видами модуляції / А.В. Шишацький, О.Г. Жук, В.В. Лютов, Р.М. Животовський // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* – 2016. – № 4. – С. 117-121.
8. Патент України на корисну модель № 107001. МПК Н04В 1/38(2015.01), Н04В 3/60 (2006.01). Програмова радіостанція з прогнозуванням завадової обстановки [Текст] / А.В. Шишацький, О.В. Кувшинов, В.А. Голуб, В.А. Романюк, Р.О. Беляков, О.Ф. Сальнікова, Т.Г. Гурський. – Заявл. 25.12.2015 року, патент опубл. 10.05.2016 року, Бюл. № 9.
9. Шишацький А.В. Алгоритм вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад / А.В. Шишацький, В.В. Ольшанський,

Р.М. Животовський // Системи озброєння і військова техніка. – 2016. – № 2. – С. 62-66.

10. Шишацький А.В. Методика вибору резервних робочих частот в системах радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти / А.В. Шишацький, О.В. Кувшинов // Дванадцята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імен Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору", тези доповідей, 13-14 квітня 2016 року. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, – 2016. – С. 214.

11. Шишацький А.В. Методика вибору робочих частот в складній електромагнітній обстановці / А.В. Шишацький // Системи управління, навігації та зв'язку Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – №1 (41) – 2017 – С. 146-149.

12. Шишацький А.В. Оцінка впливу навмисних завад на системи радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти [Текст] / А.В. Шишацький, М.В. Зірка, Н.П. Кадет, В.В. Лютов // Проблеми інфор-

матизації та управління. – К.: НАУ, 2015. – Вип. 4(52). – С. 37-44.

13. Патент України на корисну модель №107000. МПК H04B 1/54(2006.01), H04B 3/60(2006.01). Система з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти [Текст] / А.В. Шишацький, О.В. Кувшинов, В.А. Голуб, О.В. Ковбасюк, Н.П. Кадет, І.В. Борисов, Р.О. Беляков. – Заявл. 25.12.2015 року, патент опубл. 10.05.2016 року, Бюл. №9.

Надійшла до редколегії 26.05.2017

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

### МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МНОГОАНТЕННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОЙ РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

А.В. Шишацкий, А.В. Кувшинов, С.П. Петрунчак

*В статье предложено усовершенствованную методику выбора рациональных значений параметров многоантенных систем военной радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в зависимости от сигнально-помеховой обстановки. Указанная методика позволяет осуществлять прогнозирование сигнально-помеховой обстановки, выбрать наиболее подходящие рабочие частоты, а также позволяет не только изменять скорость перестройки рабочей частоты, но и изменять вид и продолжительность расширительной последовательности, а также начальное заполнение формирующего полинома.*

**Ключевые слова:** псевдослучайная перестройка рабочей частоты, сигнально-кодовая конструкция, скорость передачи информации, вероятность битовой ошибки, радиозлектронное подавление, системы ММО, прогнозирование, рабочие частоты.

### METHOD OF SELECTION RATIONAL VALUES OF PARAMETERS OF MULTI-ANTENNA SYSTEMS OF MILITARY RADIO COMMUNICATIONS WITH PSEUDO-RANDOM RECONSTRUCTION OF OPERATING FREQUENCY

A. Shishatskiy, A. Kuvshinov, S. Petrunchak

*In the article offered an improved method of selecting rational values of the parameters of multi-antenna systems of military radio communication with pseudo-random reconstruction of the operating frequency, depending on the signal-interference situation. This technology makes it possible to predict the signal-noise environment, choose the most suitable operating frequencies, and also is not only change speed of the reconstruction of the operating frequency, but also to change form and duration of the expansion sequence, and also initial filling of the forming polynomial.*

**Keywords:** pseudo-random reconstruction of operating frequency, signal-code construction, speed of information transfer, bit error probability, radio electronic suppression, MIMO systems, prediction, operating frequencies.