

УДК 621.39

СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕНАЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ



С.В. ВАСИЛЕНКО

Інститут спеціального зв'язку та захисту
інформації НТУУ «КПІ»

Abstract – A review of technology spread spectrum radio systems with a frequency hopping is presented. The analysis results indicate that these systems have a sufficient level of noise immunity in conditions of jamming of enemy organized and can be used in networks for special purposes.

Анотація – Проведено огляд технології розширення спектра систем радіозв'язку з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти. Результати аналізу показують, що дані системи мають достатній рівень завадозахищеності в умовах впливу організованих навмисних завад противника та можуть бути використані у мережах спеціального призначення.

Аннотация – Проведен обзор технологии расширения спектра систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Результаты анализа показывают, что данные системы имеют достаточный уровень помехозащищенности в условиях воздействия организованных преднамеренных помех противника и могут быть использованы в сетях специального назначения.

Вступ

У процесі функціонування радіоелектронні засоби (РЕЗ) піддаються різного роду впливам, що порушують їх нормальну роботу. Оскільки система радіозв'язку (СРЗ), як підсистема управління військами, є першочерговим об'єктом радіоелектронної боротьби (РЕБ), то вона потребує відповідного рівня захисту. Для протидії системам радіотехнічної розвідки (РТР) та радіоелектронного придушення (РЕП) противника сучасні РЕЗ широко застосовують сигнали з розширеним спектром [1]. Основними перевагами даних сигналів відносно вузькосмугових є підвищена завадозахищеність та прихованість [1].

Розширення спектра сигналів СРЗ здійснюється за однією з технологій:

- псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (ППРЧ), що передбачає дискретну зміну несуча в межах заданої смуги частот;
- пряме розширення спектра сигналів, що передбачає кодування кожного біта інформаційного потоку швидкою псевдовипадковою послідовністю (ПВП) або застосування лінійної частотної модуляції.

Тобто одним з перспективних напрямків досліджень в галузі завадозахисту СРЗ спеціального призначення (СРЗ СП) є використання широкосмугових сигналів з ППРЧ. Дані системи вже знайшли своє використання у великій кількості вітчизня-

них (P-002, P-005, P-030, P-1150) та закордонних (Акведук, Абзац, Motorola, Marconi, Thomson, Harris та інші) радіостанцій.

Аналіз публікацій та досліджень показав, що переваги ширококутових СРЗ з ППРЧ [2] роблять їх необхідними для використання у спеціальних телекомунікаційних системах силових структур, надійне функціонування яких має забезпечуватись в умовах складної радіоелектронної обстановки.

Метою статті є огляд технології розширення спектра СРЗ з ППРЧ та визначення можливості їх застосування в перспективних СРЗ СП.

Основна частина

Головною особливістю СРЗ з ППРЧ є використання методу стрибкоподібної зміни несучої частоти у виділеному робочому діапазоні частот (ΔF_{FH}). Під стрибкоподібною зміною частоти слід розуміти періодичне узгоджене переналаштування однієї або декількох робочих частот передавача та приймача. У загальному випадку сигнал з ППРЧ розглядається як послідовність модульованих радіоімпульсів, несучі частоти яких переналаштовуються в робочому діапазоні. Число таких частот і порядок їх чергування задається генераторами псевдовипадкових чисел (псевдовипадковими кодами) відповідно до вимог та тактико-технічних характеристик СРЗ.

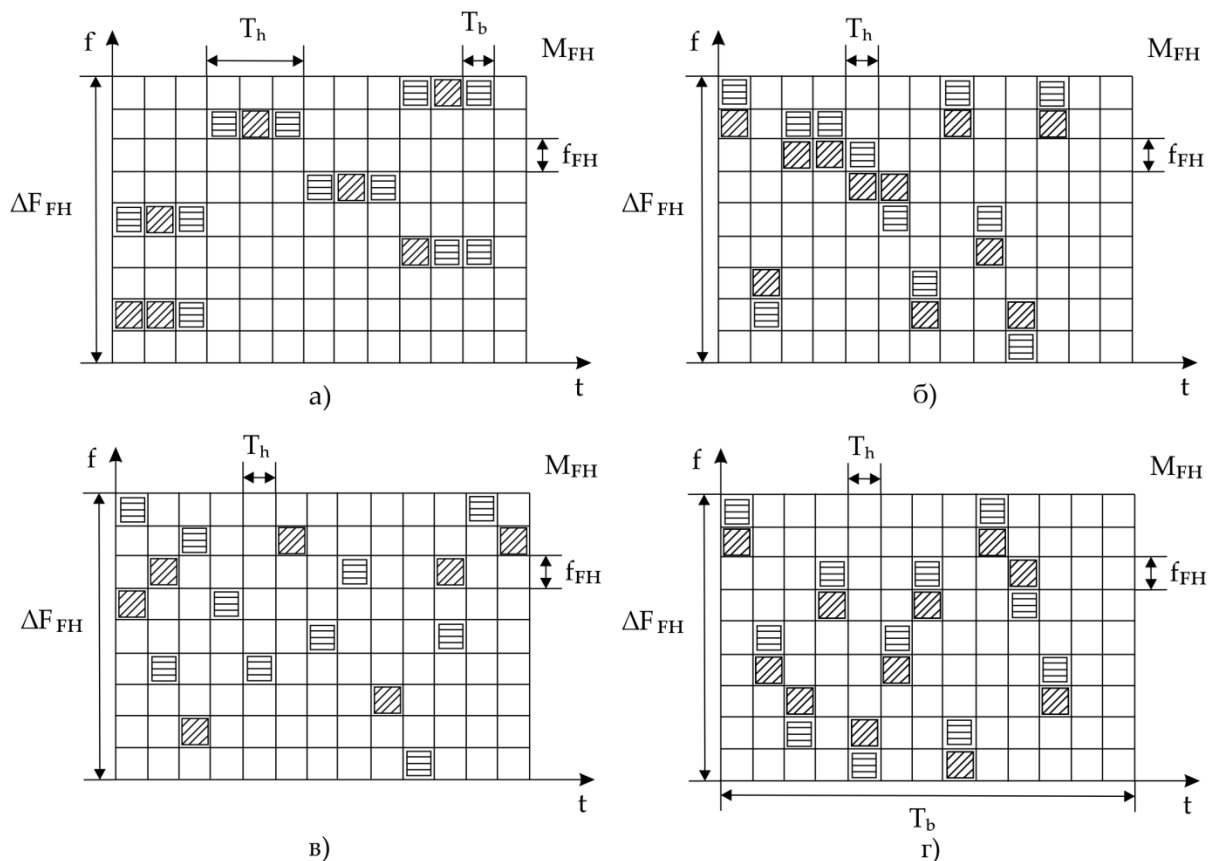
Головною умовою використання даних сигналів є детермінування псевдовипадкової послідовності радіоімпульсів, точніше їх несучих частот і часового положення, що дозволяє забезпечити частотну та часову синхронізацію сигналів. Для постановника завад закон переналаштування несучої частоти в СРЗ з ППРЧ вважається невідомим, що виключає можливість створення ефективних способів придушення. Це перешкоджає системі РЕП досягти ефективного впливу на СРЗ і змушує постановника завад розподіляти спектральну щільність потужності завади по всьому частотному діапазону СРЗ.

Залежно від співвідношення часу роботи приймача на одній частоті T_h (тривалість частотного елемента) та тривалості інформаційних символів T_b ППРЧ класифікують на: міжсимвольне, посимвольне, внутрішньосимвольне; а при двійковій ЧМ без кодування на: міжбітове, побітове та внутрішньо бітове [2]. Приклади відповідних частотно-часових матриць (ЧЧМ) представлені на рис. 1.

Важливим параметром, з погляду завадостійкості СРЗ з ППРЧ є фактичний час роботи СРЗ на одній частоті (в одній частотній позиції). Даний параметр дозволяє СРЗ з ППРЧ «втекти» від завадопостановника [2].

Розглянувши типову структурну схему СРЗ з ППРЧ з частотною модуляцією (ЧМ) без розриву фази (рис. 2), можна побачити, що для виділення сигналу приймач проводить відстеження стрибків частоти (так звану згортку ППРЧ) і демодуляцію, а у випадку кодування сигналу – ще й декодування. Згортка сигналу з ППРЧ виконується шляхом перемноження прийнятого сигналу на опорний сигнал приймача. В результаті формується функція кореляції двох сигналів (функція невизначеності). Але оскільки момент приходу сигналу на вхід приймача точно невідомий, то утворена на

виході корелятора сигналів з ППРЧ взаємкореляційна функція (ВКФ) може бути замалою, що ускладнює її ідентифікацію.





- де ΔF_{FH} – ширина смуги частот передавача;
 f_{FH} – крок сітки частот передавача;
 M_{FH} – кількість частотних позицій передавача;
 T_h – час перебування передавача у одній частотній позиції;
 T_b – час тривалості символу;
 - основний канал (канал передачі);
 - додатковий канал (канал у якому елементи повідомлення відсутні).

Рис. 1. Фрагменти частотно-часової матриці (ЧЧМ) сигналів:
 а) з міжбітовим ППРЧ і двійковою ЧМ;
 б) з побітовим ППРЧ і не випадковою двійковою ЧМ;
 в) з побітовим ППРЧ і випадковою двійковою ЧМ;
 г) з внутрішньобітовим ППРЧ і не випадковою двійковою ЧМ.

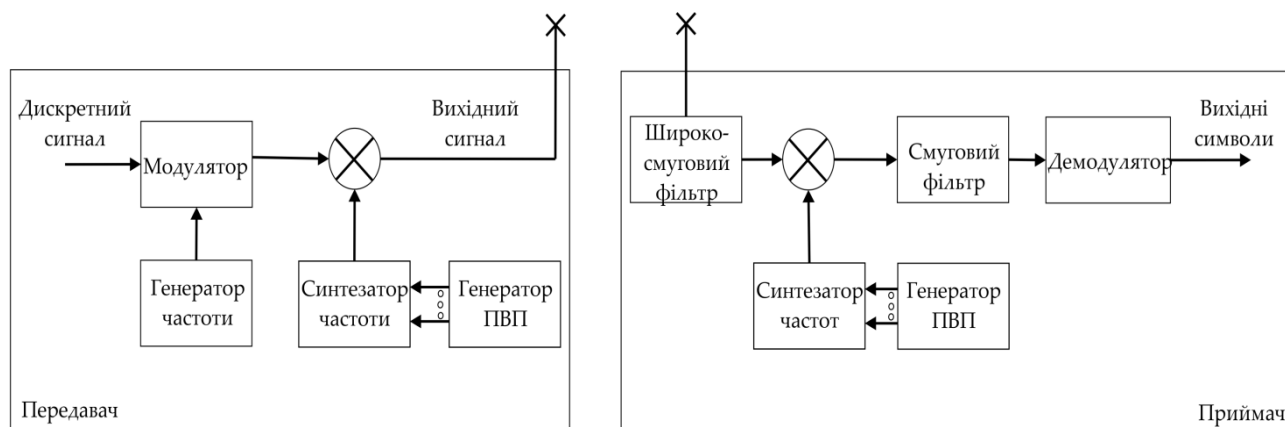


Рис. 2. Типова структурна схема системи радіозв'язку з ППРЧ

Синхронізація СРЗ з ППРЧ

Загальною особливістю всіх СРЗ з ППРЧ є необхідність забезпечення синхронізації синтезаторів передавача та приймача в частотно-часовій області. Синхронізація досягається у випадку, коли прийнята та опорна послідовності ППРЧ співпадають у часі. Очевидним шляхом вирішення даної проблеми є виявлення сигналу з одночасним виміром часу його затримки (запізнення). При цьому апріорна невизначеність значення затримки може перевищувати ширину піка ВКФ.

На першому етапі синхронізації необхідно виявити сигнал (встановити положення головного піка ВКФ) та оцінити значення затримки T_h (хоча б з точністю до більшої частини ширини піка ВКФ). Після закінчення пошуку сигналу та початку радіообміну постає питання у підтримці синхронізму. Отже, другим етапом процесу синхронізації є постійне підтримання синхронізму. Це досягається шляхом забезпечення максимального збігу опорної та прийнятої частот в часі. Узагальнена структурна схема підсистеми синхронізації представлена на рис. 3 [2].

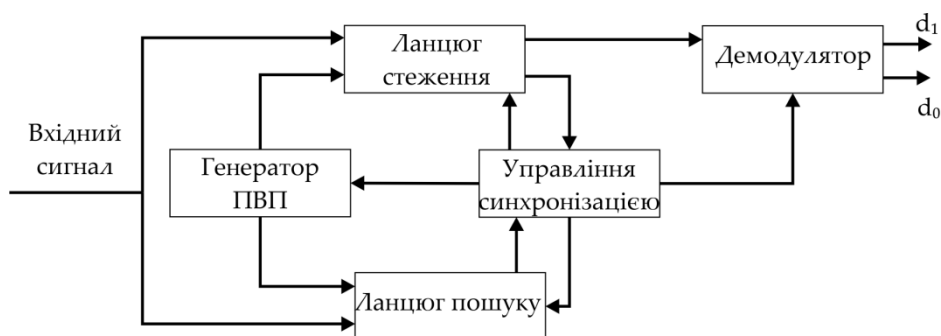


Рис. 3. Структурна схема підсистеми синхронізації

У даній підсистемі вхідний сигнал за допомогою ланцюгів пошуку захоплюється опорним генератором псевдовипадкової послідовності (ПВП) та підтримується у синхронізмі за допомогою ланцюга стеження. Конкретизація блоків даної схеми в значній мірі залежить від обраного методу синхронізації (рис. 4).

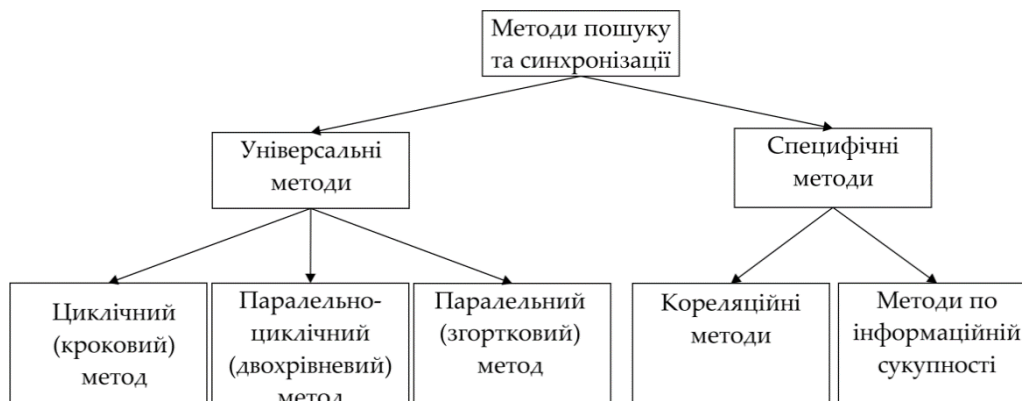


Рис. 4. Класифікація методів пошуку та синхронізації сигналів з ППРЧ

Вищенаведені методи відрізняються своєю універсальністю, швидкістю та складністю реалізації. Вибір методу синхронізації обумовлений призначенням і тактико-технічними вимогами до СРЗ. Найбільш поширеними методами пошуку та синхронізації у системах передачі інформації є універсальні методи [3].

Процес пошуку сигналів з ППРЧ здійснюється з використанням методів паралельного (рис. 5) чи послідовного (рис. 6) пошуку. Розглянемо кожен метод.

У випадку використання методу паралельного пошуку первинна обробка прийнятого сигналу здійснюється за допомогою некогерентних узгоджених смугових фільтрів (СФ), кожен із яких складається із змішувача частот, смугового фільтра та квадратурного детектора (КД). У даному випадку лінія затримки підбирається таким чином, щоб при появі шуканої послідовності система видавала вихідний сигнал значної потужності, що вказує на детектування потрібної послідовності.

Основним недоліком даного методу синхронізації є складність технічної реалізації на великих швидкостях. У цьому випадку на зміну вищенаведеної схеми (рис. 5) може бути використаний одиничний корелятор та узгоджувачий фільтр, що здійснює послідовний пошук (рис. 6). Послідовне повторення процедури дозволяє значно знизити складність і вартість системи, але тим самим збільшує час синхронізації.

Найбільш прийнятним видом синхронізації сучасних СРЗ з ППРЧ є синхронізація радіостанцій радіомережі за сигналами головної (ведучої) радіостанції. У цьому випадку радіостанція, що підлаштовується, називається веденою. Для цього в діапазоні робочих частот, виділених конкретній радіомережі, необхідно мати декілька частот, призначених для передачі кодограм синхронізації. Інформація про ці частоти і місця їх розташування у псевдовипадковій послідовності робочих частот записується в пам'ять радіостанції. На початковому етапі (до початкової синхронізації) ко-

жна радіостанція радіомережі здійснює аналіз обраних частот та обирає найкращу, на якій знаходиться в режимі чергового прийому.

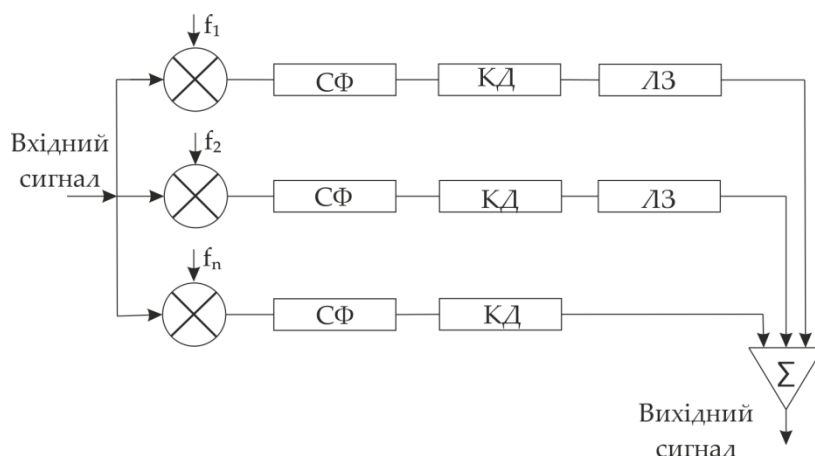


Рис. 5. Процес паралельного пошуку для системи з ППРЧ

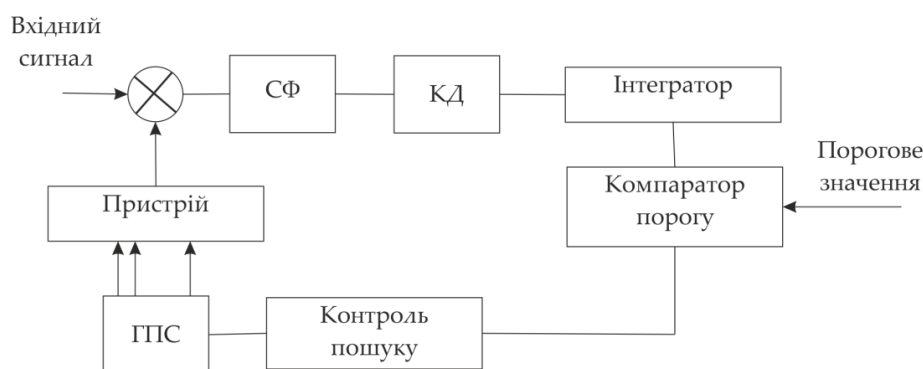


Рис. 6. Процес послідовного пошуку для системи з ППРЧ

Радіостанція, яка першою виходить в ефір, здійснює початкову синхронізацію всіх радіостанцій мережі. Для цього вона запускає свою систему синхронізації і починає сканування частот у порядку, встановленому відповідною програмою переналаштування частот. У перші часові інтервали роботи дана радіостанція на частотах, призначених для передачі інформації, починає передавати псевдовипадкову двійкову послідовність, чим імітує передачу даних. У цей же час на частотах синхронізації передаються кодограми синхронізації. Інші радіостанції, прийнявши кодограми, запускають свої програми переналаштування частоти з відповідної позиції, таким чином входячи в синхронізм.

Процес підсинхронізації проводиться за сигналами кожної радіостанції, що виходить на передачу. Дана процедура необхідна для того, щоб будь-яка радіостанція радіомережі при втраті синхронізму могла повторно увійти в синхронізм.

Виділені частоти синхронізації жорстко прив'язуються до послідовності конкретної радіомережі. Це необхідно для того, щоб будь-яка радіостанція, що входить в

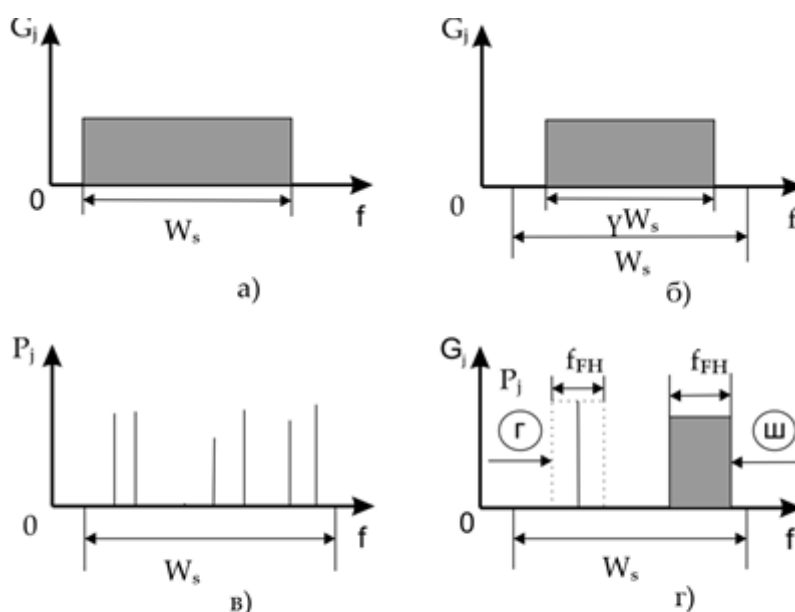
синхронізм, «знала» з якого числа (номера) псевдовипадкової послідовності їй потрібно розпочинати переналаштування. Для цього на частотах синхронізації ведучої радіостанції відбувається передача номера частотно-часової позиції в послідовності переналаштування. Як показує аналіз публікацій [2, 4], при середніх швидкостях стрибків частоти (порядку 400 стрибків/с) часу достатньо для передачі не тільки номера частотного каналу у двійковій формі, а і внесення надлишковості для підвищення завадозахищеності синхрокодограм та їх маскування.

Завадозахищеність СРЗ з ППРЧ

У процесі роботи СРЗ з ППРЧ піддаються впливу різного роду навмисних завад (рис. 7) [4]. Найбільш універсальною і стійкою до різних способів забезпечення завадостійкості СРЗ є шумова загороджувальна завада (рис. 7, а), модель якої представляє собою обмежений за смугою шум, схожий до адитивного білого гаусівського (АБГШ) зі спектральною щільністю потужності:

$$N_0 = P_j / W_s, \quad (1)$$

де P_j – потужність завади; W_s – діапазон частот завадопостановника.



- а) шумова загороджувальна завада;
- б) шумова завада в частині смуги;
- в) полігармонічна завада;
- г) завада у відповідь (⊙ - гармонічна завада; ⊗ - шумова завада).

Рис. 7. Основні види завад, що впливають на систему зв'язку з ППРЧ

Загороджувальна завада у цьому випадку перекриває частотний діапазон СРЗ і при відповідній потужності станції завад в змозі придушити весь частотний діапазон. Але у цьому випадку потужність передавача завад має бути досить великою. При цьому сама система РЕП стає радіопомітною і, як наслідок, вразливою ціллю [5]. Зазначені недоліки звужують можливості застосування завад загороджувального типу. Також система РЕП загороджувального типу представляє велику небезпеку з погляду забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) для інших РЕЗ, що працюють в тому ж діапазоні частот.

Потужність шумової завади може бути використана більш ефективно за рахунок її зосередження в обмеженій смузі частот, значно меншій, ніж діапазон частот СРЗ. Таку заваду прийнято називати шумовою в частині смуги (рис. 7, б). Спектральна щільність потужності такої завади може бути представлена у вигляді двох рівнів:

$$N_0 = \begin{cases} P_j / (\gamma W_s) & \text{у смузі } (\gamma W_s); \\ 0 & \text{у смузі } (1 - \gamma) W_s; \end{cases} \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт, що характеризує частину смуги, займаної завадою ($0 < \gamma < 1$).

Спектральна щільність потужності шумової завади в частині смуги зростає в $1/\gamma$ разів порівняно зі спектральною щільністю потужності шумової загороджувальної завади.

Найбільш небезпечною для СРЗ з ППРЧ є полігармонічна (багатотональна) завада, що являє собою набір з l немодульованих гармонічних коливань однакової потужності, що розподіляються по діапазону частот відповідно до заданої постановником завад стратегії (рис. 7, в):

$$J(t) = \sum_{i=1}^l \sqrt{\frac{2P_{jззз}}{l}} \cos(\omega_{ji}t + \varphi_{ji}), \quad (3)$$

де $P_{jззз}$ – загальна потужність завади.

Оскільки полігармонічна завада є низкою вузькосмугових, то потребує досить точного наведення її складових на центральні частоти каналів передавача з певним співвідношенням потужності завади P_j та потужності сигналу P_s :

$$\frac{P_j}{l} = \frac{P_s}{\alpha}, \quad (4)$$

де α – деяке позитивне число (параметр розподілу потужності), що обирається постановником завад відповідно до заданої стратегії.

Зауважимо, що ефективність гармонічної завади також залежить від різниці початкових фаз між завадою та сигналом. У випадку несприятливих фазових спів-

відношень та задоволення рівності $P_j = P_s$ завада може повністю придушити корисний сигнал.

Для прикладу розглянемо ймовірність виявлення сигналу при заваді типу білого гаусівського шуму, відносній фазовій модуляції (ВФМ) та некогерентному прийомі. Ймовірність помилки в цьому прикладі визначається наступним виразом [7]:

$$P_{ном} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_0}}, \quad (5)$$

де $\frac{E}{N_0} = h^2$ – відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму.

У випадку, якщо завада уражає частину робочої смуги частот:

$$P_{ном} = \rho \frac{1}{2} e^{-\rho \frac{E}{N_3 + \rho N_0}} + (1 - \rho) \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_0}}, \quad (6)$$

де $P_{ном} \leq \rho \leq 1$; ρ – частина смуги, уражена навмисною завадою; N_3 – спектральна щільність навмисної завади в усій робочій смузі частот.

Зазвичай прийом сигналу, що здійснюється на фоні навмисної завади $N_3 \ll N_0$, у цьому випадку:

$$P_{ном} \approx \rho \frac{1}{2} e^{-\rho \frac{E}{N_3}}. \quad (7)$$

Оптимальне значення ρ , що призводить до максимуму $P_{ном}$ визначається як:

$$\rho_{opt} = \frac{N_3}{E}. \quad (8)$$

При цьому

$$\max P_{ном} = \frac{1}{2} \frac{e^{-1}}{E/N_3}. \quad (9)$$

З фізичних міркувань (8) має сенс при $\frac{E}{N_3} \geq 1$.

Отже при неадаптивних методах передачі та прийому інформації завадозахищеність СРЗ з ППРЧ (без кодування) відносно шумових завад, що уражають оптима-

льну частину робочої смуги, значно нижча за заводо захищеність відносно шумових завад (тієї ж потужності) з рівномірною спектральною щільністю в смузі сигналу. Висновок стосується і інших видів маніпуляції, а також регулярних (не шумових) завад та дискретної множини гармонічних завад, що уражають частину чи всі робочі частоти.

Висновки

Складна радіоелектронна обстановка та значний розвиток засобів РЕБ показує, що сучасні засоби СРЗ з ППРЧ не завжди здатні забезпечити відповідний рівень заводо захищеності. Найбільш вразливим елементом є підсистема синхронізації, а саме та її частина, що відповідає за входження в синхронізм.

У процесі роботи СРЗ з ППРЧ змушують систему РЕП противника з обмеженою потужністю передавача певним чином розподіляти спектральну щільність потужності завади по частотному діапазону, що значно зменшує ефективність радіопридушення.

Результати аналізу показують, що СРЗ з ППРЧ мають достатній рівень заводо захищеності в умовах впливу організованих навмисних завад противника та можуть бути використані у мережах СП.

Список літератури:

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневецкий, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты // под ред. В.И. Борисова; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
3. Лосев В.В., Бродская Е.Б., Коржик В.И. Поиск и декодирование сложных сигналов/ Под ред. В.И. Коржика. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
4. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
5. Осипов А.С. Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП : учебник / А.С. Осипов; под науч. ред. Е.Н. Гарина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 344 с.
6. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е переработаное, дополненное. – М.: Изд-во «Советское радио», 1970. – 728 с.
7. Биленко А.П., Волков Л.Н. Сравнение помехозащищенности радиолиний с широкополосными сигналами // Радиотехника. – 1986. – №4 – С. 19-21.