

О. А. Нагорнюк

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ПЕРІОДИЧНОЇ, КОВЗНОЇ ЗА ЧАСТОТОЮ РАДІОПЕРЕШКОДИ

Багато сучасних засобів радіоподавлення ближньої дії будуються на основі керованих напругою генераторів, випромінювання яких є синусоїдальним коливанням із частотою, що змінюється періодично за лінійним законом у межах заданої смуги подавлення. Такі радіовипромінювання належать до періодичних, ковзних за частотою радіоперешкод, а їх потужність має нерівномірний розподіл у частотній області. Вказані радіоперешкоди мають два основні параметри, які визначають їх часові та частотні характеристики: ширина робочого діапазону частот і період повторення. Значення параметрів впливають на структуру енергетичного спектра перешкоди, що позначається на її ефективності, яка характеризується коефіцієнтом подавлення. У статті запропоновано методику вибору параметрів періодичної, ковзної за частотою радіоперешкоди для забезпечення мінімального значення коефіцієнта подавлення приймачів радіоканалів із заданими характеристиками. Вона дозволяє обрати параметри перешкоди для ефективного подавлення приймачів радіоканалів із фіксованою робочою частотою та розширенням спектра методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти. Показано, що для подавлення приймача радіосигналів із фіксованою робочою частотою період радіоперешкоди повинен бути не менше оберненого значення ширини смуги пропускання приймача. Для забезпечення мінімального значення коефіцієнта подавлення приймачів радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти потрібно враховувати допустимі ймовірності помилки під час прийому бітового символу та пакету даних, що дозволяє, за їх низьких значень, зменшити коефіцієнт подавлення на 6 дБ. Перевірку працездатності розробленої методики вибору параметрів періодичної, ковзної за частотою радіоперешкоди здійснено шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі MATLAB. Наведено залежності відносної кількості втрачених пакетів даних від відношення сигнал / перешкода та періоду повторення перешкоди.

Ключові слова: методика; періодична, ковзна за частотою радіоперешкода; параметр; радіоподавлення; коефіцієнт подавлення; передавач перешкод.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У теперішній час багато засобів радіоподавлення (РП) ближньої дії створюють на основі керованих напругою генераторів (sweep generator). Радіовипромінювання, що генерується такими передавачами перешкод, є синусоїдальним коливанням, частота якого змінюється періодично за лінійним законом у межах заданої смуги частот B_p (смуга подавлення) [1–3]. Відповідно до наявної класифікації [4] такий вид перешкод можна віднести до періодичних, ковзних за частотою радіоперешкод (ПКЧРП). Як показано в [5], ефективність впливу ПКЧРП на радіоканал із

заданими характеристиками залежить від його ширини та робочої частоти, а також від параметрів ПКЧРП, тому актуальним науковим і практичним завданням є розроблення методики вибору параметрів ПКЧРП для забезпечення заданих показників подавлення радіоканалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [6] наведено результати експериментальних досліджень впливу ПКЧРП із періодом від 1 мкс до 100 мкс на приймач радіосигналів LoRa із шириною амплітудно-частотного спектра (АЧС) 125 кГц та фактором розширення 7. Показано, що період ПКЧРП впливає на критичне значення відношення сигнал / перешкода (ВСП), відмінність у якому може становити більше 50 дБ для різних періодів.

У [7] запропоновано схему вимірювального стенда для визначення вразливості радіоліній LoRa до навмисних ПКЧРП та наведено результати експериментальних досліджень. Показано, що ПКЧРП має нерівномірний розподіл потужності в АЧС, який залежить від її періоду повторення. Це дозволяє зменшити її вплив на приймач шляхом зміни робочої частоти радіоканалу. Експериментально отримано графічні залежності критичних значень ВСП для різних періодів ПКЧРП у разі подавлення приймача радіоканалу LoRa із шириною смуги пропускання 125 кГц.

У [5] отримано аналітичний вираз для розрахунку розподілу потужності ПКЧРП у частотній області та показано, що її енергетичний спектр має максимуми на частотах, кратних оберненому значенню періоду перешкоди. Виведено математичні вирази для розрахунку залежностей ПКЧРП у смузі пропускання приймача і коефіцієнта подавлення від робочої частоти радіоканалу та періоду повторення перешкоди. Показано, що залежно від обраної частоти радіоканалу різниця потужності перешкоди, необхідної для його подавлення, може становити більше 50 дБ.

У [8] проаналізовано можливість створення ПКЧРП у дискретних піддіапазонах частот для підвищення ефективності РП каналів управління, телеметрії, супутникової радіонавігації безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Діапазони формування радіоперешкод та їх потужність запропоновано обирати відповідно до технічних характеристик БпЛА, радіоканали яких подавляються.

Отже, у проаналізованих публікаціях розглянуто вплив ПКЧРП на якість функціонування радіоканалу та шляхом експериментальних досліджень встановлено, що критичне значення ВСП (мінімально необхідне для подавлення приймача) залежить від періоду ПКЧРП, ширини смуги пропускання радіоканалу та робочої частоти. Однак у цих джерелах відсутні рекомендації та методики щодо вибору параметрів ПКЧРП.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення методики обґрунтованого вибору параметрів ПКЧРП для забезпечення мінімального значення коефіцієнта подавлення приймачів радіоканалів із заданими параметрами.

Виклад основного матеріалу. У [5] показано, що вплив структури та частотно-часових параметрів радіоперешкоди на дальність РП характеризується коефіцієнтом подавлення K_p , який вказує на мінімально необхідне відношення потужності перешкоди до потужності радіосигналу на вході приймача радіоелектронного засобу, що

подавляється, у частотній смузі пропускання його лінійної частини, за якого забезпечується задана якість (критерій) РП. Тобто коефіцієнт подавлення дорівнює оберненому значенню мінімального (критичного) ВСП q_{min} , за якого показник якості роботи радіоканалу не відповідає заданому: $K_p(\partial B) = -q_{min}(\partial B)$, де q_{min} – критичне ВСП.

Для цифрових систем зв'язку, ефективність функціонування яких визначається ймовірністю помилки під час прийому двійкового символу або пакету даних, критерій ефективності РП можна записати в такому вигляді:

$$P_b > P_b^{min}; P_{pk} > P_{pk}^{min}, \quad (1)$$

де P_b, P_{pk} – імовірності помилки під час прийому бітового символу та пакету даних;

P_b^{min}, P_{pk}^{min} – допустимі ймовірності помилки під час прийому бітового символу та пакету даних.

P_b^{min}, P_{pk}^{min} залежать від типу радіоканалу, що подавляється. Так, для нормального функціонування цифрових систем передачі мовних повідомлень (вокодерів) допустима помилка в разі прийому двійкового символу становить 10^{-2} , а для цифрових систем передачі даних – 10^{-6} [8, 9]. Однак, як показує практика, допустима кількість втрачених пакетів даних у радіоканалі керування БпЛА може досягати 90% ($P_{pk}^{min} = 0,9$).

Коли потужність радіоперешкоди розподілена рівномірно в частотній області, коефіцієнт подавлення не має залежності від несучої частоти, а визначається лише структурою радіосигналу та його параметрами. Оскільки АЧС ПКЧРП є нерівномірним [5, 7], то коефіцієнт K_p залежить від робочої частоти радіоканалу.

Модуль спектральної щільності ПКЧРП $S_p(f_n)$ можна розрахувати за таким виразом [5]:

$$|S_p(f_n)| = \left\{ \begin{array}{l} U_m \sqrt{\frac{\pi T_p}{2B_p}} \left| \sum_{n=0}^{N_p-1} e^{j2\pi f_n T_p} \right|, f_0 - 0,5B_p \leq f \leq f_0 + 0,5B_p; \\ 0, f_0 - 0,5B_p > f > f_0 + 0,5B_p \end{array} \right\}, \quad (2)$$

де T_p – період повторення;

B_p – ширина АЧС;

f_0 – центральна частота;

U_m – амплітуда;

N_p – кількість періодів.

Аналіз виразу (2) дозволяє зробити висновок, що АЧС ПКЧРП має низку локальних максимумів (пікових значень) на частотах $f_n = n/T_p, n = 0, 1, ..N_u - 1$, де $N_u = B_p T_p$ – кількість піків із шириною, обернено пропорційною періоду T_p та кількості періодів $\Delta f_{mp} = 2/(T_p N_p)$.

Оскільки потужність ПКЧРП має нерівномірний розподіл у частотній області, то залежно від робочої частоти приймача радіоканалу в смугу пропускання його лінійної частини B_c буде потрапляти перешкода різної потужності.

Потужність ПКЧРП у радіоканалі шириною B_c на частоті f_c , коли центральна частота перешкоди дорівнює нулю ($f_0 = 0$), можна розрахувати, просумувавши потужності складових енергетичного спектра $|S_p(f_n)|^2$ у смузі $[f_c - 0,5B_c, f_c + 0,5B_c]$:

$$P_B(f_c) = \sum_{n=n_1}^{n_2} |S_p(f_n)|^2; \quad f_{n_1} = f_c - 0,5B_c; \quad f_{n_2} = f_c + 0,5B_c, \quad (3)$$

де $P_B(f_c)$ – потужність перешкоди в каналі шириною B_c на частоті f_c .

На рис. 1 зображено розподіл потужності перешкоди $P_B(f_c)$, що надходить у канал шириною B_c від частоти f_c , та енергетичний спектр ПКЧРП S_p , амплітуда якого збільшена в K_m разів для наочного відображення закону його зміни. Залежності обчислено для значень: $B_c = 100$ кГц; $T_p = 4$ мкс.

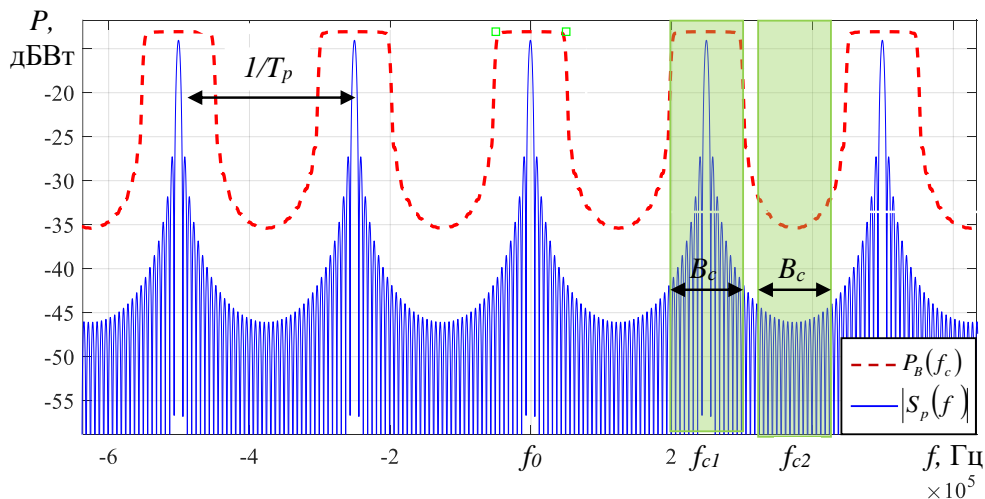


Рис. 1. Енергетичний спектр ПКЧРП та потужність перешкоди в каналі шириною B_c

Із рис. 1 видно, що потужність ПКЧРП, яка потрапляє в смугу пропускання приймача радіоканалу B_c , залежить від його робочої частоти. Тому ефективність РП приймача в різних ділянках АЧС перешкоди буде неоднаковою [7]. Оскільки коефіцієнт подавлення є оберненою величиною критичного ВСП ($K_p(\text{дБ}) = -q_{\min}(\text{дБ})$), то його значення залежатиме від робочої частоти радіоканалу та параметрів перешкоди. Для прикладу, наведеного на рис. 1, коефіцієнти подавлення в разі розміщення радіоканалу на частотах f_{c1} та f_{c2} будуть відрізнятися на 22 дБ.

Отже, необхідно розробити методику вибору таких параметрів ПКЧРП, щоб забезпечити мінімальне значення коефіцієнта подавлення радіоканалу із відомою

шириною смуги пропускання приймача B_c незалежно від місця положення його робочої частоти всередині АЧС ПКЧРП:

$$|f_0 \pm f_c| < 0,5(B_p - B_c). \quad (4)$$

У межах цієї роботи для оцінювання впливу ПКЧРП на радіоканал враховано лише її потужність, яка впливатиме на ВСП, та не взято до уваги узгодженість перешкоди зі структурою радіосигналу.

У ході розроблення методики прийнято такі припущення:

робоча частота радіоканалу може приймати будь-яке значення в межах АЧС ПКЧРП відповідно до нерівності (4);

радіосигнал передається на фіксованій частоті або має розширення спектра методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) [11].

Розрахуємо максимальне P_B^{max} , мінімальне P_B^{min} та середнє P_B^{mean} значення потужності ПКЧРП, що потрапляє в смугу пропускання приймача B_c :

$$P_B^{max} = \max(P_B(f_c)) \quad P_B^{min} = \min(P_B(f_c)); \quad P_B^{mean} = \text{mean}(P_B(f_c)) \quad (5)$$

На рис. 2 показано залежності P_B^{max} , P_B^{min} та P_B^{mean} від періоду ПКЧРП, обчислені для умов: $B_c = 100$ кГц; $B_p = 10$ МГц; $P_p = 1$ Вт. Для порівняння на рис. 2 також зображено потужність перешкоди, що потрапляє в смугу пропускання B_c , у разі її рівномірного розподілу в частотній області: $P_{hom} = P_p B_c / B_p$.

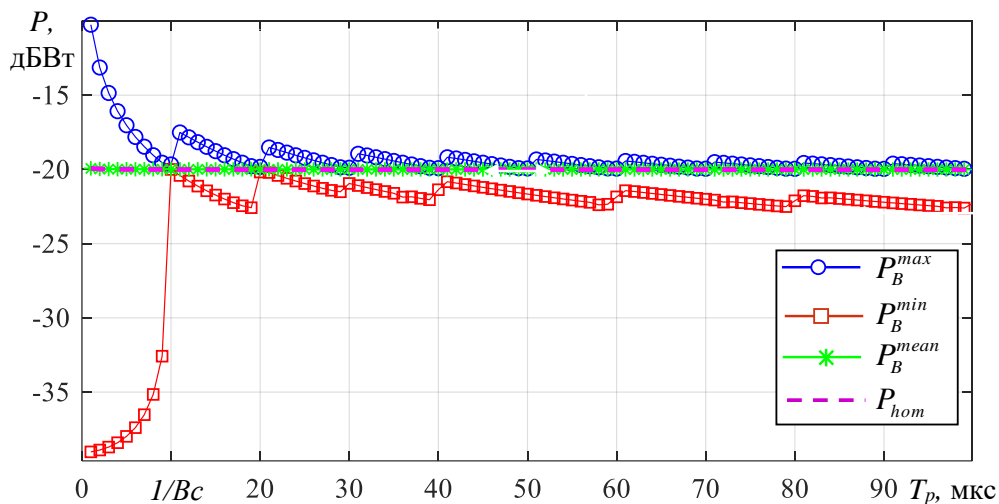


Рис. 2. Потужність перешкоди в каналі шириною B_c

Із рис. 2 видно, що різниця між максимальним і мінімальним значеннями потужності ПКЧРП у смугі B_c залежить від періоду повторення перешкоди та в разі $T_p < 1/B_c$ може становити до 30 дБ.

Для забезпечення РП приймача мінімальна потужність перешкоди на його вході P_p^{min} повинна в K_p раз перевищувати потужність радіосигналу P_c :

$$P_p^{min} = K_p P_c. \quad (6)$$

Отже, на робочих частотах радіоканалу, де $P_B(f_c) > P_{hom}$, його РП здійснюватиметься за менших значень коефіцієнта подавлення, оскільки потрібна менша потужність ПКЧРП порівняно із перешкодою з рівномірним розподілом потужності в частотній області. Відповідно, на частотах f_c , де $P_B(f_c) < P_{hom}$, значення коефіцієнта K_p буде вищим (ПКЧРП буде менш ефективною).

Якщо радіосигнал передається на фіксованій частоті, яка може приймати будь-яке значення згідно з нерівністю (4), то для забезпечення найкращого впливу ПКЧРП потрібно обрати такий період її повторення, щоб для заданих B_c забезпечити максимальне P_B^{min} .

Із рис. 2 випливає, що залежність $P_B^{min}(T_p)$ має екстремальні значення в точках, які відповідають $T_p = i/B_c$, де $i = 1, 2, 3 \dots I$. При цьому максимальне значення $P_B^{min}(T_p)$ приймає в разі $T_p = 1/B_c$.

Отже, якщо необхідно забезпечити найбільший вплив ПКЧРП на радіоканал із відомим сталим значенням B_c (створити максимальну потужність перешкоди в смузі пропускання приймача), то період перешкоди має дорівнювати $T_p = 1/B_c$.

Якщо необхідно подавити приймачі радіоканалів, ширина смуги пропускання яких знаходиться в діапазоні від B_c^{min} до B_c^{max} , то період ПКЧРП повинен бути не менше оберненого значення нижньої межі – $T_p \geq 1/B_c^{min}$.

Вибір періоду ПКЧРП відповідно до вказаних вище умов дозволить отримати найменше значення коефіцієнта подавлення незалежно від робочої частоти радіоканалу.

У ході вибору параметрів ПКЧРП для подавлення приймачів радіосигналів із ППРЧ потрібно враховувати показники критерію ефективності РП (1). Оскільки несуча частота радіосигналів із ППРЧ змінюється за псевдовипадковим законом, то ВСП у частотній смузі пропускання лінійної частини приймача для різних частотних елементів буде залежати від значення $P_B(f_c)$.

Якщо потрібно забезпечити показники P_{pk}^{min} та P_b^{min} близькими до 1, то мінімально необхідна потужність перешкоди в смузі пропускання приймача має перевищувати P_p^{min} , а період ПКЧРП вибирається, як описано вище для радіоканалу з фіксованою робочою частотою. У такому разі всі частотні елементи ППРЧ будуть гарантовано подавлені.

Якщо для порушення роботи радіолінії необхідно створити умови, за яких втрачається лише частина пакетів (частотних елементів) ($P_{pk}^{min} < 1$), то період ПКЧРП потрібно вибирати менше оберненого значення B_c . У такому разі потужність ПКЧРП у смузі B_c для деяких f_c буде більшою P_{hom} (рис. 2), що відповідатиме нижчому значенню коефіцієнта подавлення.

Відсоток частотних елементів ППРЧ, що подавляються, можна розрахувати через імовірність РП, яку обчислюють за відношенням ширини діапазону частот, де потужність перешкоди перевищує P_p^{min} , до ширини АЧС перешкоди. Оскільки розподіл потужності $P_B(f_c)$ є періодичною функцією (рис. 1), то розрахунок імовірності РП частотного елемента можна здійснювати на ділянці в один період, як показано на рис. 3.

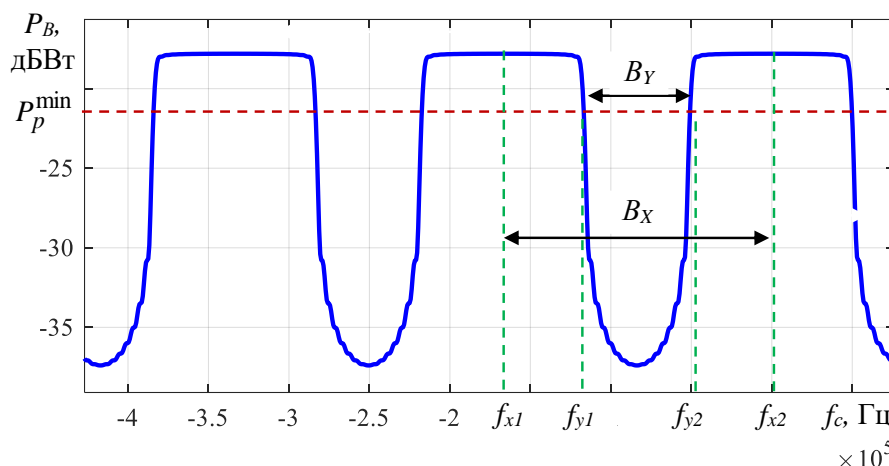


Рис. 3. Визначення ймовірності РП частотного елемента

За рис. 3 можна визначити ймовірність РП частотного елемента ППРЧ P_x як

$$P_x = \frac{B_x - B_y}{B_x}, \quad (7)$$

де $B_x = |f_{x1} - f_{x2}| = 1/T_p$;

$B_y = |f_{y1} - f_{y2}|$ – ширина діапазону частот у межах B_x , де приймач не подавляється.

Значення P_x характеризує відносну кількість частотних елементів, що подавляються. Наприклад, за $P_x = 0,2$ буде подавлено близько 20% частотних елементів.

Із рис. 3 видно, що частотний елемент ППРЧ не буде прийнятий, якщо потужність перешкоди в смузі пропускання приймача на частоті f_{ci} перевищуватиме P_p^{min} :

$$D(f_{ci}) = \begin{cases} 1, & P_B(f_{ci}) \geq P_p^{min} \\ 0, & P_B(f_{ci}) < P_p^{min} \end{cases}, \quad (8)$$

де $D(f_{ci})$ – рішення про РП на частоті f_{ci} ;

$f_{ci} = 0, \Delta f, 2\Delta f \dots 1/T_p$;

Δf – дискретність подання $S_p(f_n)$.

Врахувавши (8), імовірність РП частотного елемента можна записати як

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} D(f_{ci})}{N_s} = T_p \Delta f \sum_{i=1}^{N_s} D(f_{ci}), \quad (9)$$

де $N_s = 1/T_p \Delta f$ – розмірність масиву $D(f_{ci})$.

Для забезпечення заданого показника критерію ефективності РП потрібно обрати значення T_p , за якого $P_x = P_{pk}^{min}$. Отже, для заданого P_{pk}^{min} період T_p можна знайти з рівняння (9):

$$T_p = \frac{P_{pk}^{min}}{\Delta f \sum_{i=1}^{N_s} D(f_{ci})}. \quad (10)$$

Прийнявши до уваги наведену вище інформацію, розроблено методику вибору параметрів ПКЧРП, розглянемо її детально.

Вхідними даними для методики є значення мінімальної B_c^{min} та максимальної ширини B_c^{max} смуги пропускання приймачів, що подавляються, наявність у радіосигналі розширення спектра методом ППРЧ та показник критерію РП P_{pk}^{min} .

Методика вибору параметрів ПКЧРП складається з двох етапів:

вибір ширини АЧС перешкоди B_p ;

вибір періоду повторення перешкоди T_p .

Ширина АЧС перешкоди має перевищувати:

максимальне значення смуги пропускання B_c^{max} у разі РП приймачів радіосигналів із фіксованою робочою частотою;

максимальну ширину АЧС радіосигналів із ППРЧ B_{FHSS} за РП приймачів таких сигналів.

Оскільки ПКЧРП переважно використовується як загороджувальна за частотою радіоперешкода, то в більшості випадків ширина АЧС перешкоди значно перевищуватиме ширину смуги пропускання приймача $B_p \gg B_c$.

Для вибору періоду повторення перешкоди потрібно враховувати особливості, наведені нижче.

Якщо радіосигнал передається на фіксованій радіочастоті, то період повинен бути не менше оберненого значення нижньої межі смуги пропускання приймача $T_p \geq 1/B_c^{min}$.

Якщо радіосигнал має розширення спектра методом ППРЧ та необхідно забезпечити показник критерію ефективності РП $P_{pk}^{min} = 1$, то період перешкоди повинен бути не менше оберненого значення нижньої межі смуги пропускання приймача $T_p \geq 1/B_c^{min}$.

Якщо радіосигнал має розширення спектра методом ППРЧ, а показник критерію ефективності РП менше 1, то значення T_p визначаємо з виразу (10).

Перевірку працездатності розробленої методики вибору параметрів ПКЧРП здійснено шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі MATLAB відповідно до вимог [12]. Для цього використана програмна модель, яка включає модулі: передавача радіосигналів LoRa з ППРЧ; формувача ПКЧРП; приймача радіосигналів LoRa (некогерентне приймання [13]); формувача сигнально-перешкодової суміші; управління

параметрами радіосигналу та перешкоди; оцінювання якості роботи радіоканалу (за відносною кількістю прийнятих із помилками або втрачених пакетів даних); оброблення та узагальнення результатів.

У ході дослідження встановлювалися такі параметри радіоканалу LoRa [14]: $B_c = 125$ кГц; $SF = 9$. Для них генерувався радіосигнал LoRa з потужністю 0 дБ, здійснювалося його перенесення на частоту f_c , яка вибиралася за випадковим законом у межах $\pm 0,5(B_p - B_c)$. До радіосигналу додавалася ПКЧРП із періодом від 1 мкс до 9 мкс. Потужність перешкоди змінювалася для забезпечення ВСП у межах від -30 дБ до 0 дБ. Отримана сигнально-перешкодова суміш оброблялася програмним модулем приймача LoRa та ухвалювалося рішення про збіг прийнятого пакету даних із переданим. Відносна кількість втрачених пакетів даних (PER) рахувалася за 400 циклами моделювання для кожного значення ВСП.

Отримані в процесі моделювання залежності відносної кількості втрачених пакетів даних радіоканалу LoRa від ВСП та періоду ПКЧРП зображено на рис. 4

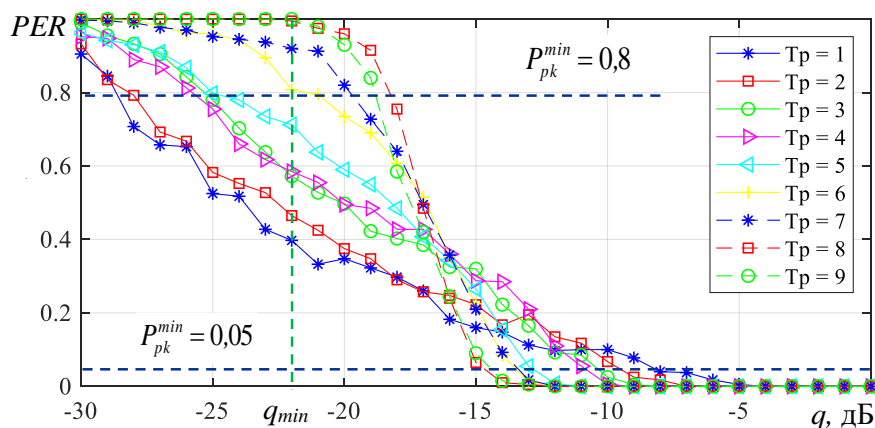


Рис. 4. Залежності відносної кількості втрачених пакетів даних радіоканалу LoRa від ВСП та періоду ПКЧРП

Із рис. 4 видно, що критичне значення ВСП для $P_{pk}^{min} = 0,05$ та $T_p < 1/B_c$ підвищується зі зменшенням періоду ПКЧРП. При цьому різниця в критичному ВСП для $T_p = 1$ мкс та $T_p = 8$ мкс близька до 6 дБ. За таких умов коефіцієнт подавлення відрізняється в 4 рази і, відповідно, дальність РП буде вдвічі більшою [5]. Критичне значення ВСП за $P_{pk}^{min} = 0,8$ для $T_p = 1$ мкс менше на 10 дБ порівняно з $T_p = 8$ мкс, що відповідає зниженню дальності РП більше ніж утричі. Отже, у разі малих значень P_{pk}^{min} для РП приймачів радіосигналів із ППРЧ доцільно використовувати ПКЧРП із періодом $T_p < 1/B_c$, а для РП усіх частотних елементів ($P_{pk}^{min} = 1$) незалежно від робочої частоти період T_p повинен бути не менше оберненого значення ширини смуги пропускання.

Теоретичну ймовірність РП частотного елемента ППРЧ, розраховану для умов комп'ютерного моделювання відповідно до виразу (10), наведено в табл. 1.

Теоретична ймовірність РП частотного елемента ППРЧ

| T_p | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|---|---|
| P_x | 0,37 | 0,43 | 0,51 | 0,62 | 0,71 | 0,83 | 0,95 | 1 | 1 |

Порівнявши теоретичні дані з табл. 1 із результатами, отриманими шляхом комп'ютерного моделювання (рис. 4), можна зробити висновок, що вони є близькими за значеннями. Це підтверджує працездатність розробленої методики вибору параметрів ПКЧРП.

Висновки. Енергетичний спектр ПКЧРП є нерівномірним та має локальні максимуми на частотах, кратних оберненому значенню її періоду, тому ефективність РП приймача радіоканалу залежить від розміщення його робочої частоти в межах АЧС ПКЧРП.

Для ефективного РП приймача радіосигналів із фіксованою робочою частотою період ПКЧРП повинен бути не менше оберненого значення ширини його смуги пропускання.

Для підвищення дальності РП приймачів радіосигналів із ППРЧ у ході вибору періоду ПКЧРП необхідно враховувати показник критерію РП, що дозволяє в разі його малого значення збільшити дальність РП удвічі.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на дослідження впливу ПКЧРП у разі її узгодження зі структурою радіосигналу.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування основних засобів радіоелектронної боротьби (ближньої дії) російської федерації / Г. Худов, І. Грідасов, І. Хижняк та ін. // Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. № 4. С. 209–218. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.209>
2. Zhang H., Liu X., Gulliver T. A New Electromagnetic Jamming System for Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Canada, 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2017.8121921>
3. Ferreira R., Gaspar J., Sebastião P., Souto N. Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms // Wireless Personal Communications. 2020. № 115 (4). P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>
4. ВСТ 602.001:2024(01) Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба. Терміни та визначення. 2024. 49 с.
5. Нагорнюк О. Дослідження впливу періодичної ковзної за частотою радіоперешкоди на радіоканал LoRa // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2024. № 98. С. 30–37. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.98.30-37>
6. Methodology to Estimate the Signal-to-Interference Power Ratio for Intermittent Disturbances / A. Jose, E. Simon, A. Boé et al. // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560235>

7. Susceptibility of LoRa Communications to Intentional Electromagnetic Interference with Different Sweep Periods / A. Jose, V. Denia, C. Gransart et al. // *Sensors*. 2022. № 22. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/s22135015>
8. Radivojević J., Pavić B., Lebl A., Petrović M. Sweep Jamming with Discrete Subbands – an Advanced Strategy for Malicious Drones Missions Prevention // *Scientific Technical Review*. 2021. Vol. 71, № 2. P. 46–52. <https://doi.org/10.5973/str2102046R>
9. Shahan P., Heide D., Cohen A. Comparison of TSVCIS Voice at 8000 and 12000 bps VERSUS CVSD at 16000 bps // *IEEE Military Communications Conference*. Orlando, 2012. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2012.6415564>
10. Basnayaka D. Introduction to Mediumband Wireless Communication // *IEEE Open Journal of the Commun. Society*. 2023. Vol. 4. P. 1247–1262. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012908>
11. Ristić V., Todorović B., Stojanović N. Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications // *Vojnotehnicki glasnik. Military Technical Courier*. 2022. Vol. 70, № 4. P. 856–876. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-38342>
12. Botev Z., Kroese D., Taimre T., Vaisman R. Data Science and Machine Learning Mathematical and Statistical Methods. 2024. 515 p. <https://doi.org/10.1201/9780367816971>
13. On the Advantage of Coherent LoRa Detection in the Presence of Interference / O. Afisiadis, S. Li, J. Tapparel, A. Burg, A. Balatsoukas-Stimming // *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8. № 14. P. 11581–11593. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3058792>
14. Bor M., Roedig U. LoRa Transmission Parameter Selection // *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. 2017. P. 27–34. <https://doi.org/10.1109/dcoss.2017.10>

Стаття надійшла до редакції 15.05.2025.

REFERENCES

1. Khudov, H., Hridasov, I., & Khyzhniak, I. et al. (2024). Analiz taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk ta taktyky zastosuvannia osnovnykh zasobiv radioelektronnoi borotby (blyzhnoi dii) rosiiskoi federatsii [Analysis of Tactical and Technical Characteristics and Tactics of Using the Main Means of Electronic Warfare (Close-Range) of the russian federation]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku [Control, Navigation and Communication Systems]*, 4, 209–218. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.209> [in Ukrainian].
2. Zhang, H., Liu, X., & Gulliver, T. (2017). A New Electromagnetic Jamming System for Unmanned Aerial Vehicles. In *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*. Canada. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2017.8121921>
3. Ferreira, R., Gaspar, J., Sebastião, P., & Souto, N. (2020). Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms. *Wireless Personal Communications*, 115 (4), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>
4. VST 602.001:2024(01) Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba. Terminy ta vyznachennia [Electromagnetic and Cyber Warfare. Radio Electronic Warfare. Terms and Definitions]. [in Ukrainian].

5. Nahorniuk, O. (2024). Doslidzhennia vplyvu periodychnoi kovznoi za chastotoiu radiopereshkody na radiokanal LoRa [Method of Automatic Parameters Estimation of Radio Signals Generated According to LoRa Standard]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Collection of Scientific Works of NTUU "KPI". Series Radio Engineering, Radio Equipment Manufacturing]*, 98, 30–37. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.98.30-37> [in Ukrainian].
6. Jose, A., Simon, E., & Boé, A. et al. (2021). Methodology to Estimate the Signal-to-Interference Power Ratio for Intermittent Disturbances. In *XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560235>
7. Jose, A., Denia, V., & Gransart, C. et al. (2022). Susceptibility of LoRa Communications to Intentional Electromagnetic Interference with Different Sweep Periods. *Sensors*, 22, 1–16. <https://doi.org/10.3390/s22135015>
8. Radivojević, J., Pavić, B., Lebl, A., & Petrović, M. (2021). Sweep Jamming with Discrete Subbands – an Advanced Strategy for Malicious Drones Missions Prevention. *Scientific Technical Review*, 71, 2, 46–52. <https://doi.org/10.5973/str2102046R>
9. Shahan, P., Heide, D., & Cohen, A. (2012). Comparison of TSVCS Voice at 8000 and 12000 bps VERSUS CVSD at 16000 bps. In *IEEE Military Communications Conference*. Orlando. (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2012.6415564>
10. Basnayaka, D. (2023). Introduction to Mediumband Wireless Communication. *IEEE Open Journal of the Commun. Society*, 4, 1247–1262. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012908>
11. Ristić, V., Todorović, B., & Stojanović, N. (2022). Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications. *Vojnotehnicki glasnik. Military Technical Courier*, 70, 4, 856–876. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-38342>
12. Botev, Z., Kroese, D., Taimre, T., & Vaisman, R. (2024). *Data Science and Machine Learning Mathematical and Statistical Methods*. <https://doi.org/10.1201/9780367816971>
13. Afisiadis, O., Li, S., Tapparel, J., Burg, A., & Balatsoukas-Stimming, A. (2021). On the Advantage of Coherent LoRa Detection in the Presence of Interference. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, 14, 11581–11593. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3058792>
14. Bor, M., & Roedig, U. (2017). LoRa Transmission Parameter Selection. In *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. (pp. 27–34). <https://doi.org/10.1109/dcoss.2017.10>

O. A. Nahorniuk

METHOD FOR SELECTION OF THE PERIODIC FREQUENCY SWEEPING RADIO INTERFERENCE PARAMETERS

Many modern short-range radio suppression means are built on voltage-controlled generators which emission is a sinusoidal oscillation with altering frequency that changes according to a linear law within a given suppression band. Such radio emissions are classified as periodic frequency sweeping radio interferences and their power has an inhomogeneous

distribution in the frequency domain. The specified radio interference has two main parameters that determine its time and frequency characteristics: the operating frequency band and the repetition period. The parameters values affect the structure of the interference energy spectrum, which influences its efficiency, that is characterized by the suppression coefficient. The method for selection of the periodic frequency sweeping radio interference parameters to ensure the minimum value of the suppression coefficient of radio channel receivers with specified characteristics is proposed in the article. The method allows to select the parameters of the interference for effective suppression of radio channel receivers with a fixed operating frequency and frequency hopping spectrum spreading. It is shown that for suppression of a fixed operating frequency radio signal receiver the interference period must be no less than the reciprocal of the receiver bandwidth. To ensure the minimum value of the suppression coefficient of radio signal receivers with frequency hopping spectrum spreading, it is necessary to take into account the acceptable error probabilities of receiving a bit symbol and a data packet, which allows, at their low values, to reduce the suppression coefficient by 6 dB. The performance of the developed method for selection of the periodic frequency sweeping radio interference parameters is verified by simulation modeling in the MATLAB software environment. The dependences of the packet error rate on the signal / interference ratio and the interference repetition period are given.

Keywords: method; periodic frequency sweeping radio interference; parameter; radio jamming; suppression coefficient; jammer.