

КОЕФІЦІЄНТ ПОДАВЛЕННЯ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕСТРОЮВАННЯМ РОБОЧИХ ЧАСТОТ

У статті отримано аналітичний вираз для коефіцієнта подавлення систем радіозв'язку з псевдовипадковим перестроюванням робочих частот для відомих типів перешкод, що використовують проти таких систем. Це дозволяє застосовувати щодо зазначених систем методики оцінювання ефективності радіоелектронного подавлення, орієнтовані на звичайні системи радіозв'язку.

Постановка проблеми. Останнім часом значення радіоелектронних систем у процесах управління військами та зброєю, у тому числі високоточною, стрімко зростає. Тому використання засобів радіоелектронного подавлення (РЕП) істотно впливає на ведення сучасних бойових дій. Оцінювання ефективності є важливою складовою процесів розроблення та використання засобів РЕП. Недоліки та прогалини в оцінюванні ефективності РЕП можуть призвести до прийняття хибних рішень та істотних прорахунків, унеможливають розв'язання оптимізаційних задач, які повинні максимізувати цю ефективність. На сьогодні та в перспективі одним із проблемних питань є подавлення систем радіозв'язку з псевдовипадковим перестроюванням робочих частот (ППРЧ). Тенденція зростання кількості систем з ППРЧ [1] потребує розроблення як засобів РЕП, так і методів оцінювання їх ефективності. Таким чином, оцінювання ефективності РЕП систем радіозв'язку з ППРЧ є важливим та актуальним науково-практичним завданням.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Питання РЕП систем радіозв'язку з ППРЧ певним чином розглянуті в узагальнених роботах з радіоелектронної боротьби [2–4] та спеціалізованих працях, присвячених завадозахищеності систем з ППРЧ [5, 6], але при цьому оцінювання ефективності РЕП таких систем безпосередньо не досліджене. Загальновідомі теоретичні основи оцінювання ефективності РЕП звичайних систем радіозв'язку (з фіксованими робочими частотами) [4, 7–9] не враховують специфіки ППРЧ та різних типів перешкод (методів), які можуть бути використані для подавлення таких систем. Відповідно, для забезпечення взаємної узгодженості оцінок ефективності РЕП доцільно максимально використовувати загальновідомі підходи [4, 7–9], але врахувати при цьому специфіку подавлення систем з ППРЧ різними типами перешкод (методами). Зазначений підхід може бути реалізований шляхом врахування специфіки систем з ППРЧ при розрахунках коефіцієнта подавлення, який дорівнює мінімально необхідному відношенню потужності перешкоди до сигналу на вході приймача в смузі його пропускання [7].

Формулювання завдання дослідження. Отже, не вирішеною раніше частиною загальної проблеми оцінювання ефективності РЕП є врахування особливостей подавлення систем радіозв'язку з ППРЧ у коефіцієнті подавлення. Відповідно, метою статті є

отримання аналітичного виразу для коефіцієнта подавлення систем радіозв'язку з ППРЧ для відомих методів подавлення таких систем (типів перешкод), а також аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо систему радіозв'язку з ППРЧ, у якій використано двійкову некогерентну частотну маніпуляцію (що реалізовано в більшості таких систем з причин розриву фази на кожному стрибку частоти), внутрішніми шумами приймача сигналу знехтуємо порівняно з потужністю перешкоди. Для подавлення систем радіозв'язку з ППРЧ зазвичай застосовують такі типи перешкод (методи подавлення): загороджувальна перешкода; гребінчаста перешкода; перешкода навздогін [2–6]. Решту типів перешкод чи методів подавлення можна вважати різновидом зазначених вище.

Вплив перешкоди на цифрову систему радіозв'язку характеризується ймовірністю помилки на біт P_E . Дана ймовірність залежить як від енергетичних показників сигналу й перешкоди, так і від їх структур (типу та параметрів маніпуляції чи модуляції). Для подавлення системи з двійковою некогерентною частотною маніпуляцією доцільно застосовувати шумоподібну перешкоду, узгоджену з шириною спектра сигналу (може бути реалізована хаотичною частотною модуляцією несучої). Хоча в окремих випадках ефективність інших типів перешкод може бути вищою, на практиці застосовують переважно зазначену. Це зумовлено тим, що гармонічна перешкода може компенсуватись шляхом прийому з одного частотного каналу, а перешкода з хаотичною частотною маніпуляцією не знаходиться в символній синхронізації з демодулятором сигналу, що може істотно зменшувати її “теоретичну” ефективність [4].

Для системи радіозв'язку з фіксованою частотою та двійковою некогерентною частотною маніпуляцією вплив шумоподібної перешкоди, узгодженої з шириною спектра сигналу, призводить до ймовірності помилки на біт P_E , яку розраховують за таким виразом [6]:

$$P_E = \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{P_C}{P_{II}} \right\}, \quad (1)$$

де P_C , P_{II} – потужності сигналу та перешкоди на вході приймача, Вт.

Аналіз виразу (1) показує, що значення P_{II}/P_C , яке забезпечує заданий рівень ймовірності помилки на біт P_{EO} (здається відповідно до призначення системи радіозв'язку, наявності завадостійкого кодування, виду інформації, що передається), і є коефіцієнтом подавлення K_{II} , тобто

$$P_{EO} = \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{1}{K_{II}} \right\}. \quad (2)$$

Відповідно, з виразу (2) можна визначити K_{II} для системи з фіксованою робочою частотою:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{-\ln(2P_{EO})}. \quad (3)$$

Для загороджувальної перешкоди прийmemo, що ширина спектра перешкоди Δf_{Π} дорівнює ширині діапазону частот, у якому здійснюється ППРЧ $\Delta f_{\text{ППРЧ}}$. У такому разі потужність перешкоди P'_{Π} , яка потрапляє на вхід приймача, узгодженого з шириною спектра сигналу Δf_C , може бути оцінена з урахуванням спектральної щільності потужності перешкоди N_{Π} як $\Delta f_C N_{\Pi}$. З урахуванням того, що N_{Π} дорівнює відношенню потужності перешкоди P_{Π} до ширини її спектра Δf_{Π} (у даному разі $\Delta f_{\Pi} = \Delta f_{\text{ППРЧ}}$), можна записати таке:

$$P'_{\Pi} = P_{\Pi} \frac{\Delta f_C}{\Delta f_{\text{ППРЧ}}}. \quad (4)$$

З виразу (4) видно, що розширення спектра перешкоди в $\Delta f_{\text{ППРЧ}}/\Delta f_C$ разів призводить до такого ж зменшення частки її потужності, яка безпосередньо потрапляє в приймач. Тоді, відповідно до визначення K_{Π} , необхідно забезпечувати аналогічне збільшення (у $\Delta f_{\text{ППРЧ}}/\Delta f_C$ разів) і коефіцієнта подавлення відносно його звичайного значення (3), тобто

$$K_{\Pi} = \frac{\Delta f_{\text{ППРЧ}}}{-\ln(2P_{EO})\Delta f_C}. \quad (5)$$

Аналіз виразу (5) показує, що для загороджувальної перешкоди коефіцієнт подавлення прямо й лінійно залежить від ширини діапазону частот, у якому працює радіомережа (радіолінія) з ППРЧ, а також прямо залежить від необхідного рівня ймовірності помилки на біт P_{EO} . Особливістю коефіцієнта подавлення (5), яка зумовлена специфікою подавлення систем з ППРЧ загороджувальною перешкодою, є те, що він враховує потужність перешкоди і поза смугою пропускання приймача.

Для гребінчастої перешкоди (яка одночасно випромінюється на всіх N_f частотах, де працює система з ППРЧ) [2, 6] її потужність рівномірно розподіляється між усіма цими частотами. Відповідно, для гребінчастої перешкоди з урахуванням (1) матимемо

$$P_E = \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{P_C N_f}{P_{\Pi}} \right\}. \quad (6)$$

Тоді аналогічно до (2) і (3) значення коефіцієнта подавлення для гребінчастої перешкоди може бути розраховане так:

$$K_{\Pi} = \frac{N_f}{-\ln(2P_{EO})}. \quad (7)$$

Аналіз виразу (7) показує, що коефіцієнт подавлення відносно системи з фіксованою частотою (3) збільшується в N_f разів, що відповідає розподілу потужності передавача перешкод між усіма N_f частотами системи радіозв'язку з ППРЧ.

Для перешкоди навздогін приймається, що ширина її спектра узгоджена з шириною спектра сигналу, тобто $\Delta f_{\Pi} = \Delta f_C$. Але при цьому має місце часткове перекриття сигналу перешкодою внаслідок відповідних часових затрат на розповсюдження радіохвиль, виявлення сигналу та формування перешкоди. Для кількісного відображення цих часових затрат доцільно ввести безрозмірний нормований коефіцієнт \mathfrak{S} перекриття сигналу перешкодою:

$$\mathfrak{S} = \frac{\tau_{\Pi}}{\tau_C}, \tag{8}$$

де τ_C, τ_{Π} – тривалість сигналу та перешкоди на одній частоті, с.

За часткового перекриття сигналу перешкодою середнє значення ймовірності помилки на біт (з урахуванням тієї частини сигналу, на яку перешкода не впливає) \bar{P}_E зменшується відносно (3) у \mathfrak{S}^{-1} разів [6]. Тому для забезпечення такого самого ступеня впливу на систему радіозв'язку з ППРЧ необхідно збільшувати P_E у тій частині сигналу, на яку діє перешкода. Тобто вираз (3) для таких умов можна записати так:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{-\ln\left(\frac{2P_{EO}}{\mathfrak{S}}\right)} = \frac{1}{\ln(\mathfrak{S}) - \ln(2P_{EO})}. \tag{9}$$

На рис. 1 зображено графік залежності $K_{\Pi}(\mathfrak{S})$, який побудовано відповідно до (9) для різних значень P_{EO} .

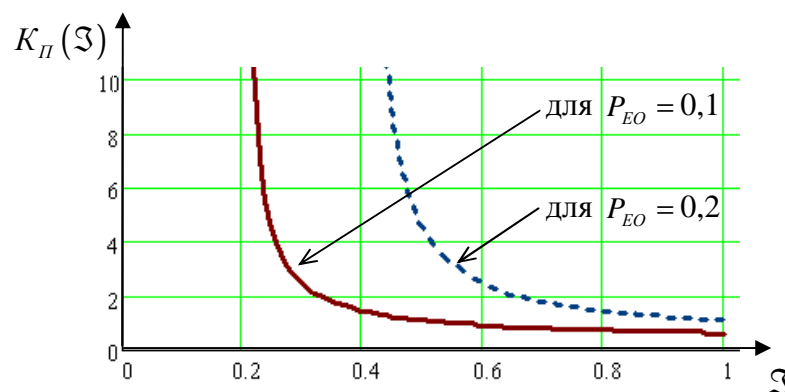


Рис. 1. Графік залежності коефіцієнта подавлення системи радіозв'язку з ППРЧ від коефіцієнта перекриття сигналу перешкодою навздогін

Як видно з рис. 1, за умови зменшення коефіцієнта перекриття сигналу необхідно забезпечувати більше значення коефіцієнта подавлення. Це дозволяє компенсувати втрату впливу на початок сигналу шляхом більш інтенсивного впливу на ту його частину, де діє

перешкода. Залежність $K_{II}(\mathfrak{S})$ асимптотично наближається зліва до вертикалі $2P_{EO}$. Тобто існує таке порогове значення коефіцієнта перекриття $\mathfrak{S}_{ПОР} = 2P_{EO}$, менше якого компенсація шляхом збільшення потужності перешкоди стає неможливою.

Для безпосереднього розрахунку значення \mathfrak{S} необхідно врахувати часову затримку перешкоди внаслідок її розповсюдження τ_3 та час реакції станції перешкод τ_p , тобто

$$\mathfrak{S} = \frac{\tau_{II}}{\tau_c} = \frac{\tau_c - \tau_3 - \tau_p}{\tau_c} = 1 - \frac{\tau_3}{\tau_c} - \frac{\tau_p}{\tau_c}. \quad (10)$$

Значення τ_3 розраховують на основі відстаней між: приймачем і передавачем сигналу R_c ; передавачем сигналу і станцією перешкод R_1 ; станцією перешкод і приймачем сигналу R_2 . Відповідну часову затримку знаходимо в такий спосіб:

$$\tau_3 = \frac{R_1 + R_2 - R_c}{c}. \quad (11)$$

Підставляючи (10) і (11) у (9), отримаємо остаточний вираз для коефіцієнта подавлення систем з ППРЧ при використанні перешкоди навздогін:

$$K_{II} = \left(\ln \left(1 - \frac{R_1 + R_2 - R_c}{c\tau_c} - \frac{\tau_p}{\tau_c} \right) - \ln(2P_{EO}) \right)^{-1}. \quad (12)$$

Аналіз виразу (12) показує, що коефіцієнт подавлення системи радіозв'язку з ППРЧ перешкодою навздогін залежить від: необхідного ступеня впливу на систему (P_{EO}); взаємного положення передавача перешкод, передавача та приймача сигналу (R_c, R_1, R_2); часу реакції станції перешкод (τ_p) та тривалості сигналу на одній частоті (τ_c) або швидкості зміни частот.

У табл. 1 наведено результати розрахунків значення K_{II} відповідно до виразу (12) для різних варіантів τ_c та τ_p і таких початкових даних: $P_{EO} = 0,1$; $R_c = 10$ км; $R_1 = 20$ км; $R_2 = 20$ км.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта подавлення для перешкоди навздогін

τ_c , мс	τ_p , мс				
	0,1	0,2	0,5	1	2
10	0,629	0,633	0,646	0,671	0,728
5	0,638	0,646	0,675	0,735	0,939
2	0,665	0,691	0,798	1,233	–
1	0,721	0,797	1,443	–	–

З табл. 1 видно, що при збільшенні часу реакції станції перешкод коефіцієнт подавлення зростає, причому стрімкіше – за меншої тривалості сигналу на одній частоті. В окремих випадках (позначених у табл. 1 прочерком) забезпечити необхідну ймовірність помилки на біт ($P_{EO}=0,1$) стає неможливим, навіть шляхом суттєвого перевищення потужності перешкоди над сигналом.

Висновки. Таким чином, у результаті досліджень отримано аналітичні вирази для коефіцієнта подавлення систем радіозв'язку з ППРЧ за використання загороджувальної (5), гребінчастої перешкоди (7) та перешкоди навздогін (12). Показано, що для останньої до певних меж можлива компенсація невиконання часової умови подавлення за рахунок підвищення потужності перешкоди. Коефіцієнт подавлення, який для систем з фіксованими робочими частотами є константою (за визначених структур сигналу та перешкоди) для подавлення систем з ППРЧ перешкодою навздогін, є функцією (12), що додатково залежить від взаємного положення станції перешкод, передавача та приймача сигналу, часу реакції станції перешкод та тривалості сигналу на одній частоті. Отримані коефіцієнти подавлення дозволяють оцінювати ефективність РЕП систем радіозв'язку з ППРЧ на основі енергетичної умови подавлення за такими самими методами та методиками, що існують для систем з фіксованими робочими частотами.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у врахуванні специфіки подавлення інших складних радіоелектронних систем у значенні коефіцієнта подавлення для узагальнення теоретичних основ оцінювання ефективності РЕП та взаємного узгодження результатів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайцев И. В. Системы военной радиосвязи и направления их развития / И. В. Зайцев, А. А. Молев // Военная мысль. – 2014. – № 10. – С. 65–73.
2. Куприянов А. И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М. : Вузовская книга, 2007. – 356 с.
3. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов. – М. : Вузовская книга, 2007. – 468 с.
4. Радзиевский В. Г. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / В. Г. Радзиевский, А. А. Агафонов. – М. : Радиотехника, 2006. – 424 с.
5. 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.
6. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев ; под ред. В. И. Борисова. – [2-е изд.; перераб. и доп.]. – М. : РадиоСофт, 2008. – 512 с.
7. Довідник з протиповітряної оборони / А. Я. Торопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник та ін. – Х. : ХВУ, 2003. – 368 с.
8. Осипов А. С. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП / А. С. Осипов, Е. Н. Гарин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 344 с.

9. Field Manual (FM) 3-36: Electronic Warfare in Operations, U. S. Army, 2009. – 139 p.

Подано 06.02.2015

Ю. В. Журавский, В. А. Кирилюк

КОЭФФИЦИЕНТ ПОДАВЛЕНИЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧИХ ЧАСТОТ

В статье получено аналитическое выражение для коэффициента подавления систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот для известных типов помех, которые применяют против таких систем. Это позволяет использовать для указанных систем методики оценивания эффективности радиоэлектронного подавления, ориентированные на обычные системы радиосвязи.

Y. V. Zhuravskiy, V. A. Kyryliuk

JAMMING COEFFICIENT OF FREQUENCY HOPPING COMMUNICATION SYSTEMS

In this article, an analytic expression for the jamming coefficient of frequency hopping communication systems for known types of jam used against such systems. This allows the use of the said systems methods of jamming effectiveness evaluating used on conventional radio system.