

к.т.н. Гурський Т.Г. (ВІТІ)
к.т.н. Жук О.Г. (ВІТІ)
Кривенко О.В. (ВІТІ)
Шишацький А.В. (ЦНДІ ОБТ)

НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПЕРЕСТРОЙКОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

Стаття присвячена аналізу завдань, які виникають при розробці та експлуатації засобів радіозв'язку (ЗРЗ) з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти (ППРЧ). Запропоновано можливі напрямки вирішення цих завдань. Особлива увага звертається на підвищення заводо захищеності ЗРЗ з ППРЧ.

Гурський Т.Г., Жук А.Г., Кривенко А.В., Шишацький А.В. Направления усовершенствования средств радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Статья посвящена анализу задач, возникающих при разработке и эксплуатации средств радиосвязи (СРС) с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Предложены возможные направления решения этих задач. Особое внимание обращается на повышение помехозащищенности СРС с ППРЧ.

T. Hursky, O. Zhuk, O. Kryvenko, A. Shishatskiy The Ways of Improvement of Radio Communication Means with Frequency Hopping Spread Spectrum Mode. The article analyses the problems which are appeared in the development and service of Radio Communication Means (RCM) with Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) Mode. The possible ways of settlement of these tasks are proposed. Particular attention is turned to improvement of anti-jam facility of RCM with FHSS modes.

Ключові слова: засоби радіозв'язку (ЗРЗ), псевдовипадкова перестройка робочої частоти (ППРЧ), станція завод (СЗ), заводо захищеність.

Вступ. Системи і засоби військового радіозв'язку функціонують у складній радіоелектронній обстановці, що зумовлюється навмисними і ненавмисними завадами, які діють в каналі, та завмираннями сигналів, що виникають внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль.

У сучасних військових засобах радіозв'язку, зокрема, виробництва „Harris” (США), „Elbit” (Ізраїль), „Thales” (Франція), комплексів „Акведук”, „Азарт”, „Граніт” (Російська Федерація) та ін. з метою підвищення розвід- і заводо захищеності використовується режим псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ). Суть ППРЧ полягає у тому, що радіостанції кореспондентів одночасно за невідомим постановнику заводо псевдовипадковим законом швидко переходять на нову радіочастоту. При використанні режиму ППРЧ успішність функціонування радіоліній значною мірою залежить від технічних можливостей засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) противника, а також від швидкості перестройки частоти. Якщо на одній частоті передається більше одного інформаційного символу, швидкість перестройки вважається високою (внутрісимвольна ППРЧ), в іншому разі – низькою (міжсимвольна ППРЧ) [1].

Разом з підвищенням стійкості до впливу навмисних заводо, швидка зміна робочої частоти дозволяє боротися і з багатопроменевістю (за умови, що копії сигналу приходять порівняно з основним сигналом настільки більший шлях, що приймач уже перестроєний на іншу частоту в момент їх приходу).

Крім УКХ та КХ радіозасобів, ППРЧ застосовується і у військових радіорелейних станціях, наприклад, МИК-РЛ400ПР виробництва РФ [2], системах супутникового зв'язку військового призначення [3].

Проте, засоби радіозв'язку з ППРЧ мають і недоліки, основними з яких є наступні:
станції РЕБ, за певних умов, здатні подавлювати системи з ППРЧ;
підвищені вимоги до системи синхронізації;
створення взаємних заводо військовим та цивільним радіозасобам, смуги робочих частот яких потрапляють у смуги систем з ППРЧ, або частково перекриваються;
зниження швидкості передачі інформації, порівняно з системами на фіксованій частоті.

Тому метою статті є аналіз завдань, що виникають при розробці та експлуатації систем радіозв'язку з ППРЧ та визначення напрямків їх вирішення.

Виклад основного матеріалу.

Підвищення стійкості до впливу навмисних завад противника. Для подавлення СРЗ можуть застосовуватися різні види організованих завад, що реалізуються у відповідних станціях завад (СЗ). Все різноманіття варіантів СЗ визначається в основному шляхами, якими їх розробники прагнуть сконцентрувати обмежену потужність передавачів в певних частотних діапазонах, часових інтервалах та просторових секторах. Метою постановника завад є розробка такої стратегії вибору завади, яка при загальній обмеженості потужності передавача завад P_3 повинна забезпечити мінімізацію відношення сигнал/завада на виході приймача.

Шумова загороджувальна та шумова завада в частині смуги. Найбільш універсальною і стійкою до різних способів підвищення завадостійкості СРЗ є шумова загороджувальна завада (рис. 1) [1], моделлю якої є обмежений у смузі білий гаусівський шум зі спектральною щільністю потужності G_3 ,

$$G_3 = P_3 / \Delta f_c, \quad (1)$$

де Δf_c – ширина спектра сигналу.

Загороджувальна завада повинна перекривати частотний діапазон СРЗ і при відповідній потужності СЗ бути в змозі подавити СРЗ при будь-яких способах перестройки частоти. Оскільки частотний діапазон СРЗ може бути досить значним, потужність передавача завад повинна бути достатньо великою. У зв'язку з цим СЗ загороджувального виду представляють велику небезпеку з точки зору забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) для інших радіоелектронних засобів (РЕЗ), що працюють в тому ж діапазоні частот. При цьому сама СЗ стає радіопомітною і, як наслідок, уразливою ціллю для засобів вогневого ураження противника. Відмічені недоліки звужують можливості застосування СЗ загороджувального виду [1].

Потужність шумової завади може бути використана ефективніше за рахунок зосередження її в обмеженій смузі частот, значно меншій, ніж діапазон частот СРЗ. Таку заваду прийнято називати шумовою завадою в частині смуги (зосередженою по спектру завадою, завадою з частковим перекриттям спектру сигналів СРЗ) (рис. 2). Спектральна щільність потужності шумової завади в частині смуги G_3 , може бути представлена у вигляді двох рівнів [1, 4]:

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

де γ – коефіцієнт, що характеризує частину смуги сигналу, яку займає завада, $0 \leq \gamma \leq 1$.

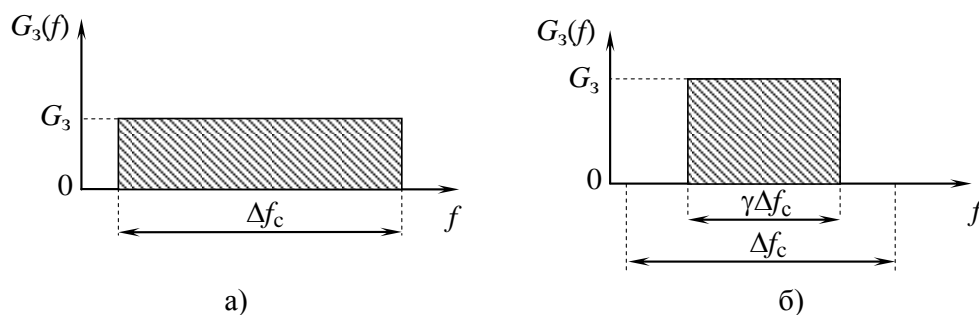


Рис. 1. Шумова завада: а) загороджувальна; б) в частині смуги

Як випливає з (2), спектральна щільність потужності шумової завади в частині смуги зростає в $1/\gamma$ разів у порівнянні зі спектральною щільністю потужності шумової загороджувальної завади (1). Станція шумових завад з рівномірно розподіленою потужністю в межах смуги $\gamma\Delta f_c$ подавлює 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/шум, для випадку, коли СРЗ використовує некогерентну частотну модуляцію (ЧМ) для різних значень γ представлено на рис. 2 [5]. В табл. 1 наведено відповідні значення γ .

Таблиця 1

γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	γ_7	γ_8	γ_9	γ_{10}
0,0001	0,0005	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,3	0,5	1

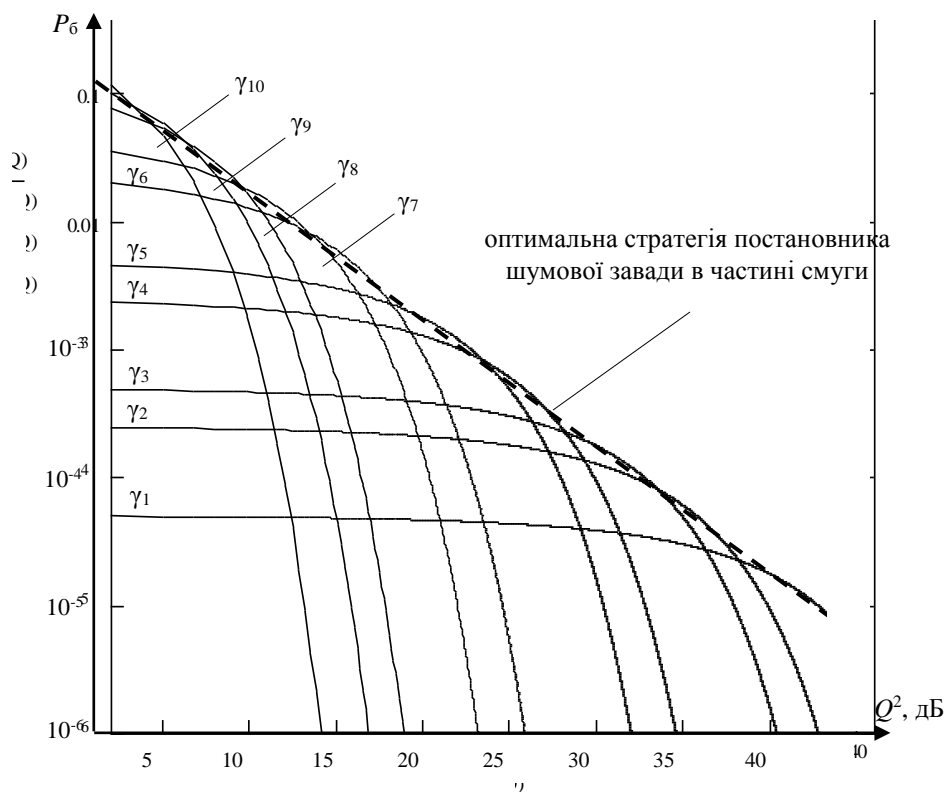


Рис. 2. Завадостійкість радіолінії з ППРЧ при впливі ШЗЗ та ШЗЧС

Очевидно, що при даній моделі завади для будь-якого співвідношення сигнал-завада P_c/P_z має місце оптимальне значення частини подавлюваної смуги γ_{opt} , при якій завадостійкість СРЗ буде мінімальною. Завада з такими параметрами є найгіршою для СРЗ. З метою поточної оптимізації ширини спектру завади в частині смуги і потужності завади в СЗ необхідно мати станцію радіотехнічної розвідки (РТР) для вимірювання параметрів сигналів СРЗ, що підлягають подавленню.

Напрямки вдосконалення радіозасобів з ППРЧ при впливі ШЗЗ та ШЗЧС. При впливі ШЗЧС у разі унеможливлення передачі інформації через перевищення P_6 допустимого значення необхідно збільшувати ширину хопсета – смуги частот, у межах якої здійснюється перестройка. При цьому, противник змушений буде розширювати спектр завади, при $\gamma = 1$ вона перетвориться у ШЗЗ. Якщо у СЗ вичерпані енергетичні можливості, вона не може створити заваду з необхідною спектральною щільністю потужності (СЩП) і не

здатна подавити радіолінію. В іншому випадку, єдиним виходом СРЗ є збільшення потужності передавача.

У сучасних ЗРЗ з ППРЧ розширення хопсета 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, 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 РЕБ.

Слід зауважити, що зі збільшенням ширини хопсета погіршується якість зв'язку (збільшується ймовірність помилки через те, що закони поширення радіохвиль значно відрізняються для різних частотних елементів, і тим більше, чим далі вони рознесені по частотній осі), а значить – зменшується дальність зв'язку. Якщо дальність необхідно зберегти на тому ж рівні – слід зменшувати швидкість передачі інформації.

Тому напрямком удосконалення радіозасобів при впливі ШЗЗ та ШЗЧС є створення методик вибору параметрів радіостанцій, які без участі оператора забезпечать автоматичний вибір необхідної середньої частоти та ширини хопсету, а також швидкості перестройки частоти для забезпечення заданої швидкості, якості та дальності зв'язку.

Полігармонійна завада. Для СРЗ з ППРЧ ефективною завадою, за певних умов, є полігармонійна (багатотональна) завада [1], що представляє собою набір із l немодульованих гармонійних коливань рівної потужності, розподілених по діапазону частот f_c відповідно до заданої постановником завад стратегії (рис. 3).

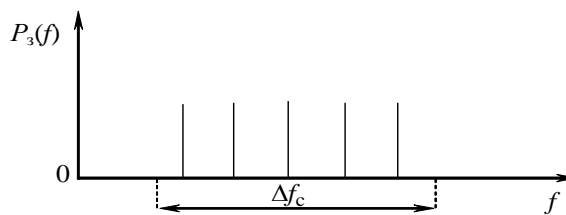


Рис. 3. Полігармонійна завада

Наприклад, для СРЗ з ППРЧ для створення ефективною полігармонійної завади потрібне достатньо точне наведення вузькосмугових завад на центральні частоти каналів, а також забезпечення на вході i -го каналу приймача СРЗ необхідного співвідношення потужності завади P_3 і потужності сигналу P_c . Ефективність полігармонійної завади, що діє в тому ж каналі, в якому знаходиться і сигнал, залежить від різниці фаз між завадою і сигналом. При несприятливих фазових співвідношеннях і рівності $P_3 = P_c$ завада може повністю подавити корисний сигнал.

Напрямки вдосконалення радіозасобів з ППРЧ при впливі полігармонійної завади. Для збільшення завадозахищеності до впливу полігармонійної завади СРЗ повинна, як і випадку ШЗЗ та ШЗЧС мати можливість збільшувати ширину хопсета, змінювати центральні частоти елементів сигналу, збільшувати потужність. Деякі типи радіостанцій з ППРЧ використовують обмежену кількість частот, незважаючи на ширину хопсета. Наприклад, радіостанція Р-002 виробництва ТОВ „Телекарт-Прилад” може використовувати до 256 частот, що значно спрощує завдання постановника завад. Тому кількість частот у хопсеті повинна бути максимально можливою.

Завада у відповідь. Наявну потужність СЗ найбільш раціонально можна використовувати при створенні завад у відповідь (ретрансльованих завад) [1, 4, 6]. Потужність передавача завад в цьому випадку концентрується лише в смузі частот СРЗ, що подавлюється, і лише під час її роботи. У якості завади у відповідь можуть застосовуватися

шумова і вузькосмугова (гармонійна) завада, а також комбінація шумової і вузькосмугової завад.

Завади у відповідь певною мірою є копією частотних елементів сигналу СРЗ, що подавлюється. Це може привести до того, що на приймальній стороні СРЗ такі завади можуть бути сприйняті як корисні сигнали свого кореспондента. У загальному випадку завадами у відповідь можуть бути модульовані шумом перехоплені частотні елементи сигналу. Моделлю таких завад є стаціонарний вузькосмуговий гаусівський процес.

Для застосування завад у відповідь станція РТР повинна здійснювати аналіз радіоелектронної обстановки і вибір на цій основі СРЗ, що підлягає подавленню. За відсутності прийому сигналів від СРЗ випромінювання завади припиняється і станція РТР переходить в режим пошуку сигналів СРЗ. Слід зазначити, що завада у відповідь особливо ефективна проти СРЗ на фіксованих частотах та з міжсимвольною (повільною) ППРЧ [1].

Завади у відповідь з погляду енергетичних можливостей є одними з найбільш ефективних для подавлення СРЗ. Наприклад, для СРЗ з ППРЧ їх ефективність не залежить від коефіцієнта виграшу, який має СРЗ за рахунок розширення спектру сигналів. Проте створення завад у відповідь для СРЗ з ППРЧ за порівняно короткий час передачі частотних елементів сигналу (стрибків частоти) нашттовується на технічні і організаційні труднощі.

Серйозною проблемою, з якою стикаються при створенні завад у відповідь, є не тільки обмеження за часом передачі завад, але і обмеження по потужності станції завад. Якщо одночасно перехоплюється декілька сигналів в різних частотних каналах, то СЗ вимушена або розподіляти свою потужність між цими сигналами рівномірно, або спробувати виділити сигнали тільки тієї СРЗ, що підлягає подавленню.

Результат впливу ретрансльованих завад на приймач радіозасобу з ППРЧ у загальному випадку може бути оцінений величиною середньої ймовірності помилки на біт інформації P_6 [6]:

$$P_6 = \rho P_1 \left(\frac{E_c}{G_0 + G_3} \right) + (1 - \rho) P_2 \left(\frac{E_c}{G_0} \right), \quad (5)$$

де P_1 – середня ймовірність помилки на біт при впливі ретрансльованої завади; P_2 – середня ймовірність помилки на біт при відсутності ретрансльованих завад на вході демодулятора; E_c – енергія сигналу; G_0 – спектральна щільність потужності шуму; G_3 – спектральна щільність потужності завади; ρ – коефіцієнт, що характеризує частину частотного елемента, вражену завадою (коефіцієнт перекриття), $0 \leq \rho \leq 1$.

У перспективних станціях ретрансльованих завад УКХ діапазону, що використовують новітні технічні досягнення і швидкодіючу мікропроцесорну техніку в апаратурі РЕП, мінімальний час спрацьовування $\Delta t_{\text{спр. min}}$ може складати десятки мікросекунд і менше [6]. У цих умовах важливим параметром радіозасобу з ППРЧ (з погляду завадозахищеності) є фактичний час роботи на одній частоті Δt_p .

Цей параметр, який визначає швидкість перестроювання частоти $\nu_{\text{пер}}$, характеризує можливість радіозасобу з ППРЧ „втікати” від впливу ретрансльованих завад. Час роботи радіозасобу на одній частоті визначається, в основному, шириною смуги частотного каналу і кінцевим часом переключення синтезатора частот.

Коефіцієнт перекриття сигналу ретрансльованою завадою залежить не тільки від часу спрацьовування $\Delta t_{\text{спр}}$, але і від взаємного розташування (топології) передавача і приймача СРЗ, а також станції ретрансльованих завад на місцевості, що визначає час затримки завади Δt_3 (рис. 4).

Якщо час роботи радіозасобу на одній частоті Δt_p менший, ніж сумарний час спрацьовування $\Delta t_{\text{спр}}$ і час запізнювання завади Δt_3 , обумовленого розміщенням (топологією) на місцевості передавача і приймача СРЗ та станції ретрансльованих завад і кінцевою швидкістю поширення радіохвиль, то ретрансльована завада є неефективною. У цьому

випадку коефіцієнт $\gamma = 0$, а середня ймовірність помилки на біт P_6 , як видно з формули (5), визначається тільки власними шумами приймача.

При цьому допустимий час роботи Δt_p приймача без впливу на нього завад дорівнює [6]

$$\Delta t_p \leq \Delta t_{\text{спр}} + \Delta t_3; \quad \Delta t_3 = \frac{1}{C_p}(r_1 + r_2 - r_{12}),$$

де r_1 – відстань від станції ретрансльованих завад до передавача СРЗ, r_2 – відстань від станції ретрансльованих завад до приймача СРЗ, r_{12} – відстань передавачем і приймачем СРЗ, C_p – швидкість поширення радіохвиль.

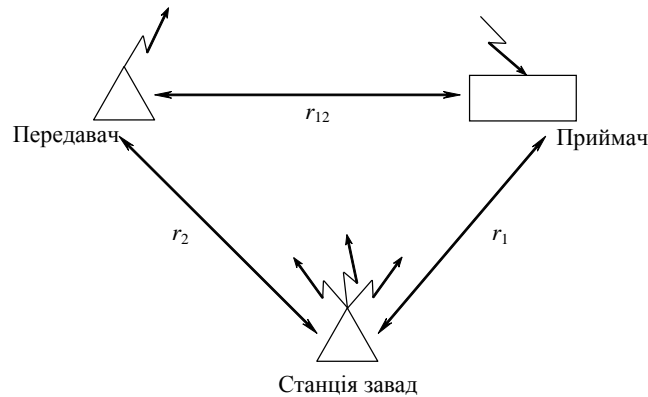


Рис. 4. Схема розташування радіолінії та станції завад

Чим ближче приймач СРЗ знаходиться до станції ретрансльованих завад, тим менше допустимий час його роботи Δt_p без впливу завад.

Ефективний вплив ретрансльованої завади при її достатній потужності на приймач СРЗ з ППРЧ досягається при виконанні співвідношення

$$(1 - \gamma)\Delta t_p \geq \frac{r_1 + r_2 - r_{12}}{C_p} + \Delta t_{\text{спр}}. \quad (6)$$

Використовуючи нерівність (6), можна оцінити часові можливості станції ретрансльованих завад для подавлення СРЗ з різною тривалістю роботи на одній частоті.

При виборі швидкості ППРЧ у військових УКХ радіостанціях необхідно враховувати, що зі збільшенням швидкості ППРЧ підвищується захищеність від організованих завад і погіршуються умови для виявлення і пеленгації, але у той же час, підвищується вартість радіостанцій, погіршується електромагнітна сумісність, зростає час синхронізації. Прийнятні швидкості ППРЧ лежать у діапазоні 50-600 стр/с [4].

При таких швидкостях захищеність від організованих завад у відповідь є теоретично невисокою, однак на практиці постановку завади у відповідь складно реалізувати через високу щільність радіостанцій у зоні ведення бойових дій, а також внаслідок багатопроменевості та доплерівських зсувів частоти. Тому вважається, що збільшення швидкості ППРЧ понад 200 стр/с не дає переваг. Проте в багатьох сучасних радіостанціях УКХ діапазону швидкість ППРЧ скаладає до 600-1000 стр/с і більше.

На рис. 5 показано обвідну і часові інтервали окремих складових частотного елемента при міжсимвольній ППРЧ [1, 4]. На рисунку прийнято наступні позначення: T_{dc} – інтервал часу, протягом якого синтезатор частоти не видає напруги („мертвий” час); T_r , T_f – інтервали часу наростання і спаду фронтів частотного елемента, відповідно; $T_{d\omega}$ – інтервал часу, протягом якого частотний елемент має повну амплітуду і передаються інформаційні та кодові символи („активний” час); сумарний час $T_{sw} = T_r + T_f + T_{dc}$ називається інтервалом переключення. З урахуванням введених позначень тривалість стрибка частоти $T_h = T_{d\omega} + T_{sw}$.

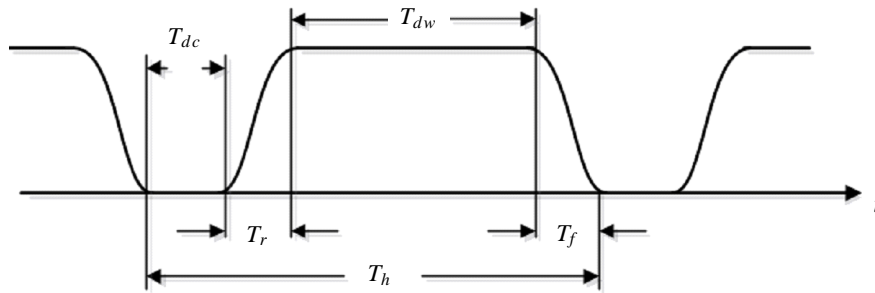


Рис. 5. Обвідна і часові інтервали окремих складових частотного елемента при міжсимвольній ППРЧ

Очевидно, що чим більша швидкість перестройки частоти, тим менша інформаційна швидкість, оскільки час переключення T_{sw} не можна довільно зменшувати з ряду причин: обмежена швидкодія синтезатора частоти збуджувача передавача; „дзвін” на виході фільтра проміжної частоти приймача; підсилення завад від сусідніх частотних каналів приймача та ін. Це підтверджується й аналізом характеристик радіостанцій з ППРЧ. У табл. 2 систематизовано дані по швидкості передачі інформації для радіостанції Harris RF-7850M-НН [7].

Таблиця 2

Швидкість ППРЧ	Передача мови (ширина каналу 25 кГц)	Передача даних (ширина каналу 75 кГц)
100	16 кбіт/с (CVSD), 2,4 кбіт/с (MELP)	64 кбіт/с
300	12 кбіт/с (CVSD), 2,4 кбіт/с (MELP)	48 кбіт/с
1000	Тільки 2,4 кбіт/с MELP	–

У радіостанціях комплексу „Азарт” (РФ) швидкість ППРЧ досягає до 20000 стр/с, при цьому швидкість передачі даних складає всього 7,2 кбіт/с [4].

Зменшення інформаційної швидкості при зростанні швидкості ППРЧ пов’язане з тим, що час переключення залишається незмінним, а активний час частотного елемента зменшується, тому відношення T_{dw}/T_h зменшується при $T_{sw} = \text{const}$.

В існуючих радіостанціях пауза між випромінюванням на сусідніх частотних елементах (T_{sw}) складає близько 10 % від часу однократного використання частоти T_h [4].

Якщо передача мови не потребує високих швидкостей передачі, то при передачі даних виникає завдання досягнення максимально можливої швидкості, а значить – зменшення швидкості перестройки частоти і, як наслідок, погіршення завадозахищеності відносно ретрансльованих завад.

Напрямки вдосконалення радіозасобів з ППРЧ при впливі полігармонійної завади. При передачі даних в умовах впливу ретрансльованих завад виникає декілька задач, які повинні бути реалізовані у відповідних алгоритмах (режимах) роботи радіостанцій:

1) забезпечення мінімально необхідної швидкості ППРЧ при якій коефіцієнт перекриття завадою частотного елемента дорівнює нулю, а швидкість передачі даних – максимально можлива. При цьому необхідно враховувати, що збільшення інформаційної швидкості призведе до розширення спектра сигналу і, як наслідок, при фіксованій потужності передавача – до зменшення відношення сигнал/шум (ВСШ) на вході приймача. Тому збільшення швидкості повинне супроводжуватись зворотним зв’язком передавача та приймача кореспондентів (для підтримання ВСШ на мінімально допустимому рівні). Допустиме значення ВСШ встановлюється виходячи з граничної чутливості приймача для заданого значення ймовірності помилки (при передачі даних, як правило, 10^{-6}) [8];

2) на етапі входження в зв'язок необхідно забезпечити максимальну дальність зв'язку (для визначення найбільш віддалених кореспондентів) при мінімально необхідній швидкості передачі інформації;

3) для забезпечення максимальної прихованості передачі інформації та розвідзахищеності, необхідно забезпечити максимізацію швидкості ППРЧ та мінімізацію потужності передавача при заданих швидкості передачі інформації та дальності.

Якщо ж противник намагається ставити заваду у відповідь (значить факт нашої роботи йому відомий) – доцільно, якщо є можливість та необхідність, зменшити швидкість ППРЧ і за рахунок збільшення часу активної роботи збільшити інформаційну швидкість.

При передачі мови швидкість фіксована, тому оптимізація параметрів зводиться або до збільшення дальності зв'язку (мінімізація швидкості ППРЧ), або до підвищення завадозахищеності (максимізація швидкості ППРЧ). При цьому ймовірність бітової помилки повинна складати $10^{-2} \dots 10^{-3}$ [8].

Крім цього, підвищення завадозахищеності при передачі мови може бути досягнуто удосконаленням алгоритмів аналого-цифрового перетворення.

Параметри, значення яких можуть змінюватись при забезпеченні як передачі даних, так і мови є швидкість перестройки, швидкість передачі інформації (для передачі даних), ширина хопсета, потужність передавача.

Розв'язання задач, спрямованих на підвищення завадозахищеності ЗРЗ з ППРЧ як в умовах завад у відповідь, так і завад інших типів, може бути реалізовано у рамках технології програмованих радіостанцій – SDR (Software-Defined Radio) та радіостанцій з інтелектуальним управлінням. Підхід до побудови інтелектуальних радіосистем отримав назву когнітивного радіо. Основи технології когнітивних радіосистем представлені, зокрема, у вигляді стандарту IEEE 802.22.

Когнітивна радіосистема може отримувати знання про середовище експлуатації та свій внутрішній стан, на основі чого динамічно та автономно коригувати власні експлуатаційні параметри та протоколи для досягнення поставлених раніше цілей і навчатися на основі отриманих результатів [9].

Забезпечення спільної роботи багатьох радіомереж у загальній смузі частот. У систему зв'язку з ППРЧ спочатку закладений елемент „ненадійності”. Це викликано тим, що одночасно на одних частотах працює кілька незалежних систем зв'язку, що призводить до випадкових збігів частот, тобто до виникнення внутрішньосистемних завад, що знижують значення коефіцієнта готовності зв'язку.

В СРЗ з ППРЧ ймовірність взаємних завад можна зменшити шляхом збільшення кількості частотних каналів (розширення хопсету). Крім цього, важливо обирати вид модуляції з якомога компактнішим спектром, наприклад, частотна маніпуляція без розриву фази [10].

Організаційним заходом, спрямованим на зниження внутрішньосистемних завад є урахування частот інших РЕЗ при плануванні хопсетів, введення у радіостанції заборонених смуг частот (для забезпечення ЕМС з іншими РЕЗ при налаштуванні радіозасобів з ППРЧ, як правило, є можливість виключити потрапляння робочої частоти у певні смуги частот).

Пошук необхідного технічного рішення може лежати у площині дослідження псевдовипадкових послідовностей (ПВП), за законами яких змінюються робочі частоти радіомереж, що працюють поряд і створюють взаємні завади [11]. Крім цього, необхідно врахувати, від криптографічної стійкості ПВП залежить стійкість СРЗ від розкриття радіотехнічною розвідкою закону перестройки частоти.

Застосування ППРЧ у радіомережах класу MANET. Технологія ППРЧ дає можливість організувати гнучку стратегію розподілу каналів у мобільних радіомережах з динамічною маршрутизацією – MANET (Mobile Ad Hoc Network) [10] та отримати виграв у пропускну здатність мережі порівняно з роботою на фіксованих частотах.

У роботі [11] показано, що коли мобільна радіомережа з ППРЧ використовує некогерентну частотну маніпуляцію (ЧМ) без розриву фази її продуктивність залежить від індексу модуляції, кратності модуляції (крім двійкової може застосовуватись багатопозиційна ЧМ), швидкості завадостійкого коду, потужності передавача. Компроміс між даними параметрами існує, але на практиці їх значення часто вибираються довільно.

Система синхронізації. Прийом і обробка сигналів ППРЧ вимагає точної синхронізації між опорними ПВП приймача і передавача [13].

Тільки в разі, коли параметри сигналу, в тому числі і його запізнювання за часом, відомі в точці прийому, можлива ефективна робота приймального пристрою СРЗ. В реальних умовах з цілого ряду причин (нестабільність генераторів в передавачі і приймачі, затримка сигналу при поширенні від передавача до приймача і ін.) Точний момент приходу сигналу на вхід приймача невідомий. Система синхронізації в режимі ППРЧ виконує наступні завдання: первинну синхронізацію всіх радіостанцій СРЗ; поточну синхронізацію радіостанцій в процесі обміну інформацією; введення в будь-який час в синхронізм з радіомережею радіостанції, з яких-небудь причин вийшла з синхронізму; введення в синхронну радіомережу нових радіостанцій. Виходячи з цих завдань, до системи синхронізації пред'являються наступні вимоги: процес синхронізації повинен бути автоматичним і займати мінімальний час; синхронізація повинна забезпечуватися при гранично низьких значеннях сигналу на вході приймача; синхронізація повинна зберігатися протягом тривалих проміжків часу за рахунок місцевих джерел синхронізації (при неприйнятті окремих або декількох кодограм синхронізації, в режимі радіомовчання і т.д.); кодограми синхронізації повинні бути захищені від навмисних, випадкових завад; кодограми синхронізації (за формою, положенням в інформаційному потоці) повинні бути невиразні для радіорозвідки противника; система синхронізації не повинна вимагати „мітки” істинного часу перед входженням в синхронізм [13].

У сучасних ЗРЗ з ППРЧ завдання синхронізації успішно використовується за допомогою прийому сигналів GPS. Проте, слід враховувати можливий вплив завад на канали прийому GPS, можливе перебування радіостанцій поза зоною пориття супутників. Тому система синхронізації повинна ефективно підтримувати синхронізм як за допомогою прийнятих сигналів GPS, так і з використанням власного високостабільного опорного кварцового генератора [14].

Висновки. Таким чином, для забезпечення передачі інформації в умовах активної радіоелектронної протидії противника у сучасних військових засобах радіозв'язку використовується режим псевдовипадкової перестройки робочої частоти.

Основним недоліком існуючих ЗРЗ з ППРЧ є відсутність автоматичної адаптації до стану каналу зв'язку – швидкість перестройки частоти, ширину смуги частот, швидкість передачі інформації, потужність та інші параметри повинен змінювати оператор радіостанції. Тому перспективними напрямками подальших досліджень є наступні:

розробка методик, які забезпечать автоматичний вибір параметрів засобів радіозв'язку з ППРЧ в залежності від поточної сигнально-завадової обстановки у каналі зв'язку;

удосконалення методів оцінки каналу для ідентифікації параметрів завад;

інтелектуалізація процесів ведення радіозв'язку шляхом впровадження технології SDR та створення когнітивних радіостанцій;

розробка математичних моделей функціонування систем радіозв'язку з ППРЧ в умовах радіоелектронного конфлікту, проведення дослідження їх надійності та вироблення пропозицій щодо підвищення надійності зв'язку;

оптимізація просторово-частотно-часового ресурсу мобільних радіомереж класу MANET.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио Софт, 2008. – 512 с.

2. Аганесов А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha / А. В. Аганесов // Системы управления, связи и безопасности. – №2. – 2015. – С. 99 – 134. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-02/04-Aganesov.pdf>.

3. Мобильные решения для систем связи и безопасности. – Томск: ЗАО “НП Ф “Микран”, 2014. – 27 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.micran.ru/sites/micran_ru/tmpl/micran_ru/inc/pdf/mks.pdf.

4. 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.: ил.

5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. под общ. ред. А. В. Назаренко. – М.: „Вильямс”, 2003. – 1104 с.

6. Кувшинов О.В. Вибір параметрів системи рухомого радіозв’язку з ППРЧ при впливі ретрансльованої завади / О.В. Кувшинов, В.І. Глущкий, С.П. Лівенцев // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2003. – Вип. 6. – С. 68 – 73.

7. RF-7850M-НН. Multiband Networking Handheld Radio. Operations Manual – Harris Corporation, RF Communications Division, New York, 2014. – 237 p.

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. – Pp. 106 – 118.

9. Рекомендации по внедрению стандарта беспроводной связи IEEE 802.22 в системах радиосвязи специального назначения / [Масесов Н.А., Панченко И.В., Бондаренко Л.А., Малых В.В.] // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2013. – Вип. 1. – С. 24 – 30.

10. S. Talarico. Optimization of an Adaptive Frequency-Hopping Network / S. Talarico, M. C. Valenti, D. Torrieri // IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), 2015. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/1508.05694.pdf>.

11. M. C. Valenti. Adjacent-channel interference in frequency-hopping ad hoc networks / M. C. Valenti, D. Torrieri, S. Talarico // in Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC), (Budapest, Hungary), Jun. 2013.

12. Гурський Т.Г. Напрямки застосування псевдовипадкових послідовностей в радіомережах спеціального призначення / Т.Г. Гурський, О.Г. Жук, С.О. Клімович // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 6. – С. 160 – 167.

13. Коломиец А.С. Синхронизация в системах радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / А.С. Коломиец, А.С. Жученко, А.П. Барда // Радиоэлектронні і комп’ютерні системи. – 2006. – № 2 (14). – С. 10 – 14.

14. On accurate time synchronization of multi-sensor mapping systems / [C. Toth, S.W. Shin, D. A. Grejner-Brzezinska, J. Nyoun Kwon] // Journal of Applied Geodesy. – 2008. – № 2. – Pp. 159 – 166.