

УДК 621.396

Т.Г. Гурський

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ДУТ, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОЛІНІЙ З ППРЧ В УМОВАХ ЗАВАД У ВІДПОВІДЬ

Запропоновано спосіб формування сигналу при передачі мови та даних багатопроменевими каналами зв'язку з навмисними завадами у відповідь, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації засобами радіозв'язку з ППРЧ. Ідея способу полягає у розосередженні у часі сусідніх символів інформаційного сигналу, що потрапляють під вплив завади.

Ключові слова: система радіозв'язку, завадозахищеність, псевдовипадкова перестройка робочої частоти (ППРЧ), завада у відповідь, перемешування.

Вступ

Системи і засоби військового радіозв'язку функціонують в складній радіоелектронній обстановці, що зумовлюється природними і навмисними завадами, які діють в каналі та завмираннями сигналів внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль. У сучасних системах радіозв'язку з метою підвищення надійності, розвід- і завадозахищеності широкого розповсюдження отримують засоби, що використовують режим псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ). Відповідно до нього передавач і приймач одночасно за невідомим постановнику завад псевдовипадковим законом швидко переходять на нову радіочастоту.

Аналіз публікацій. Дослідженню систем радіозв'язку (СРЗ) з ППРЧ присвячено багато публікацій, значна частина яких систематизована в [1 – 3]. Зокрема, ці видання містять детальний аналіз завадостійкості радіоліній з ППРЧ при впливі різних видів завад – шумової загороджувальної та шумової в частині смуги, полігармонійної (багатотональної) комбінованої (шумової та гармонійної) тощо.

При використанні режиму ППРЧ для СРЗ однією із самих несприятливих завад є ретрансльована завада (завада у відповідь) [4]. Ефективний вплив завад на СРЗ з ППРЧ може бути досягнуто лише при умові знання постановником завад відповідних параметрів сигналів СРЗ, зокрема, центральних частот каналів, швидкості стрибків частоти, ширини інформаційної смуги частот, потужності сигналу й завади в точці прийому. Вказані параметри СРЗ постановник завад добуває, як правило, безпосередньо з допомогою станції радіотехнічної розвідки (РТР), а також шляхом перерахунку вимірних параметрів СРЗ в інші, функціонально пов'язаними з ними, характеристиками. Наприклад, встановивши тривалість стрибка частоти, можна розрахувати ширину смуги частотного каналу приймача СРЗ [3].

Формулювання мети статті. При використанні режиму ППРЧ успішність функціонування радіоліній

залежить значною мірою від технічних можливостей засобів РЕБ противника, а також від швидкості перестройки частоти. Якщо відстань від постановника завад до приймача невелика, а час визначення частоти СРЗ та формування завади прямує до нуля (принаймні, він постійно зменшується з розвитком електроніки та елементної бази), навіть високі швидкості перестройки можуть не забезпечити задовільну якість передачі інформації. Тому перспективним напрямком досліджень видається використання методів завадостійкого кодування та перемешування з урахуванням тривалості уражених елементів сигналу.

Метою статті є підвищення завадозахищеності радіоліній з ППРЧ з навмисними завадами у відповідь за рахунок додаткового перемешування інформаційного потоку.

Виклад основного матеріалу

Процес функціонування систем радіозв'язку в умовах радіоелектронного подавлення за своїм фізичним змістом являє собою радіоелектронний конфлікт, у якому приймають участь з одного боку – СРЗ, а з іншого – система радіоелектронного подавлення (РЕП), що складається в загальному випадку з станції радіотехнічної розвідки, яка забезпечує пошук, виявлення і вимірювання параметрів сигналів СРЗ, та безпосередньо, станції завад [5].

Станція ретрансльованих завад, яка має у своєму складі апаратуру радіотехнічної розвідки, для вирішення задач по подавленню СРЗ з ППРЧ повинна забезпечувати:

виявлення сигналів радіозасобів у всьому робочому діапазоні частот за якомога коротший час;
вимірювання частоти і напрямку приходу захопленого сигналу з заданою точністю;
настроювання передавача завад на частоту сигналу, що подавлюється;
випромінювання завади в заданому просторовому секторі.

Закінчення дії ретрансльованої завади повинно збігатися з моментом припинення випромінювання

сигналів радіозасобу. Час, необхідний на виконання перерахованих функцій (час спрацьовування станції ретрансльованих завод) $\Delta t_{\text{спр}}$, повинний бути досить малим, щоб ретрансльована завада встигла впливати на приймач до того моменту, коли передавач перебудується на іншу частоту.

Слід зазначити, що можливості пошукових систем станції радіотехнічної розвідки, час реакції станції завод, а також час розповсюдження радіохвиль при створенні завод не в повній мірі враховуються при аналізі заводо захищеності СРЗ [2]. Невраховування обмежених можливостей системи РЕП призводить до завищення її ефективності і, відповідно, до заниження реальної заводо захищеності СРЗ.

Результат впливу ретрансльованих завод на приймач радіозасобу з ППРЧ у загальному випадку може бути оцінений величиною середньої ймовірності помилки на біт інформації P_6 [1]:

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

де P_1 – середня ймовірність помилки на біт при впливі ретрансльованої завади; P_2 – середня ймовірність помилки на біт при відсутності ретрансльованих завод 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 заводою (коефіцієнт перекриття), $0 \leq \rho \leq 1$. У перспективних станціях ретрансльованих завод 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 [4]. У цих умовах важливим параметром радіозасобу з ППРЧ (з погляду заводо захищеності) є фактичний час роботи на одній частоті Δt_p . Цей параметр, який визначає швидкість перестроювання частоти $v_{\text{пер}}$, характеризує можливість радіозасобу з ППРЧ „втікати” від впливу ретрансльованих завод. Час роботи радіозасобу на одній частоті визначається, в основному, шириною смуги частотного каналу і кінцевим часом переключення синтезатора частот.

Коефіцієнт перекриття сигналу ретрансльованою заводою залежить не тільки від часу спрацьовування $\Delta t_{\text{спр}}$, але і від взаємного розташування (топології) передавача і приймача СРЗ, а також станції ретрансльованих завод на місцевості, що визначає час затримки завади Δt_3 (рис. 1).

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 завод і кінцевою швидкістю поширення радіохвиль, то ретрансльована завада є неефективною.

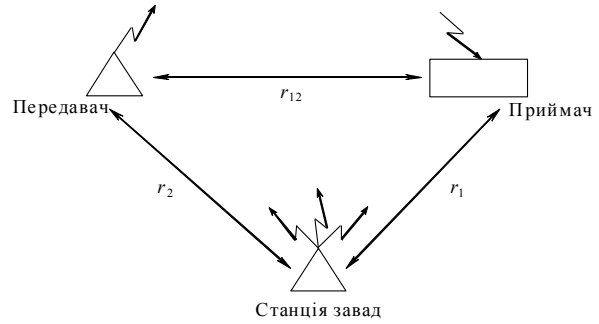


Рис. 1. Схема розташування радіолінії та станції завод

У цьому випадку коефіцієнт $\rho = 0$, а середня ймовірність помилки на біт P_6 , як видно з формули (1), визначається тільки власними шумами приймача. При цьому допустимий час роботи Δt_p приймача без впливу на нього завод дорівнює [4]

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

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

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

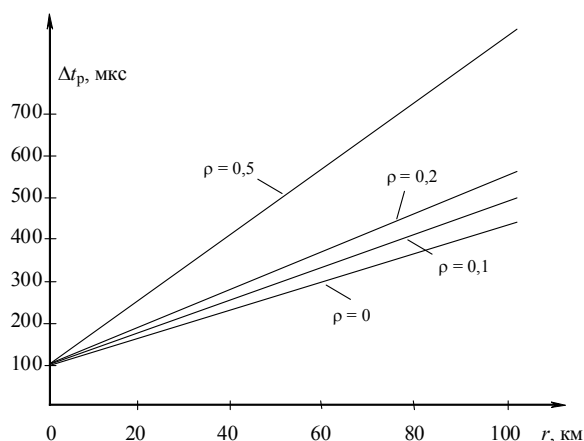
Ефективний вплив ретрансльованої завади при її достатній потужності на приймач СРЗ з ППРЧ досягається при виконанні співвідношення

$$(1 - \rho) \Delta t_p \geq \frac{r_1 + r_2 - r_{12}}{C_p} + \Delta t_{\text{спр}}. \quad (2)$$

Використовуючи нерівність (2), можна оцінити часові можливості станції ретрансльованих завод для подавлення СРЗ з різною тривалістю роботи на одній частоті.

На рис. 2 приведені залежності допустимого часу роботи Δt_p приймача СРЗ без впливу ретрансльованих завод від відстані $r = r_1 + r_2 - r_{12}$ для різних значень коефіцієнта перекриття ρ і $\Delta t_{\text{спр}} = 100$ мкс. Як видно з рисунка, забезпечення необхідної швидкості перестроювання частоти СРЗ $v_{\text{пер}} = 1/\Delta t_p$ знижує ефективність традиційних засобів радіоелектронного подавлення практично до нуля.

В табл. 1 приведені рекомендовані значення допустимого часу роботи Δt_p і, відповідно, швидкості перестроювання частоти СРЗ з ППРЧ від відстані до станції ретрансльованих завод r для різних значень коефіцієнта перекриття ρ і часу спрацьовування $\Delta t_{\text{спр}}$, що дозволяють позбутися від впливу ретрансльованих завод. Задача подавлення таких СРЗ для системи РЕП має фундаментальний характер і не може бути вирішена шляхом вдосконалення існуючої техніки прицільних завод.

Рис. 2. Залежність допустимого часу роботи радіолінії на одній частоті від відстані r

Таблиця 1

Необхідні значення швидкості перестроювання частоти СРЗ з ППРЧ

ρ	r (км)	при $\Delta t_{\text{спр}} = 100$ мкс	
		Δt_p (мкс)	$v_{\text{пер}}$ (стриб/с)
0	5	116	8571
0	15	150	6667
0	50	266	3750
0	80	366	2727
0,1	5	129	7714
0,1	15	166	6000
0,1	50	296	3375
0,1	80	407	2455
0,2	5	145	6857
0,2	15	187	5333
0,2	50	333	3000
0,2	80	458	2182
0,5	5	233	4286
0,5	15	300	3333
0,5	50	533	1875
0,5	80	733	1364

Використання загороджувальних завад, створених наземними засобами РЕП є неефективним через обмеження енергетичного ресурсу та необхідність забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС). Необхідна потужність наземного передавача загороджувальних завад може виявитися настільки великою, що загороджувальна завада позбавить власні війська можливості користуватися радіозв'язком [1].

Проте, у роботі [3] стверджується, що прийнятні швидкості ППРЧ лежать в діапазоні 50-600 стрибків/с. При таких швидкостях захищеність від організованих завад у відповідь виявляється теоретично невисокою, однак на практиці постановка завади вслід виявляється складно реалізованою через високу щільність радіостанцій у зоні ведення бойових дій, а також внаслідок багатопроменевості та доплерівських зсувів частоти. Тому вважається [3], що підвищення швидкості ППРЧ понад 200 стрибків/с не дає переваг. Наприклад, швидкість програмної перестройки частоти військових радіозасобів сімейства

„Акація” виробництва ТОВ „Телекарт-Прилад” складає 312,5 стриб/с ($\Delta t_p = 3,2$ мс). В перспективних радіостанціях УКХ діапазону швидкість ППРЧ складає до 600-1000 стрибків/с [3]. Радіостанції виробництва Harris комплексу RF-7850 підтримують такий ряд швидкостей: 100; 300; 1000 стрибків/с, а радіостанції комплексу „Азарт” виробництва Російської Федерації – до 20000 стрибків/с [3].

Логічно припустити, що радіолінія з ППРЧ повинна вибирати мінімально необхідну швидкість перестройки, оскільки при цьому можна збільшити дальність зв'язку або швидкість передачі інформації.

Ще одним важливим параметром є банк частот („хопсет”), який включає усі частоти, на яких може працювати радіолінія. Очевидно, що з погляду розвідахищеності їх кількість повинна бути максимально можливою, а значить лежати у межах усього діапазону робочих частот і включати усю можливу сітку робочих частот. Це збільшить час сканування діапазону і, крім цього, ускладнить постановку багатотональної завади. Обмеження на цей параметр можуть накладати заборонені частоти (частотні смуги), сусідні радіозасоби, що можуть бути джерелами завад.

З метою забезпечення в СРЗ з ППРЧ статистичної незалежності помилок при прийомі символів на передавальній стороні здійснюється так зване перемежування, при якому кожний символ кодового слова передається по окремому частотному каналу. Таким чином, перемежування перетворює сигнал у часовій області у безструктурну форму, що ускладнює створення оптимальних завад [3]. З метою відновлення вихідного порядку слідування символів на приймальній стороні здійснюється операція деперемежування символів. Застосування перемежування символів в СРЗ як з повільною, так і з швидкою перестройкою частоти дозволяє коригувати пакети помилок, спричинені імпульсними завадами на окремих ділянках діапазону частот СРЗ.

Очевидно, що при раціональному перемежуванні символів можна досягнути зменшення негативного впливу ретрансльованих завад, а реалізація схеми перемежування повинна визначатися видом інформації, що передається.

Передача мови. Існує дві принципово нових групи методів аналого-цифрового перетворення мови [6]. Перша група реалізує перетворення форми (обвідної) сигналу. У сучасних радіозасобах широко розповсюджений метод адаптивної дельта-модуляції зі змінним кроком квантування – CVSD.

Іншу принципово відмінну групу методів АЦП мови реалізують вокодері, робота яких заснована на кодуванні параметрів спектрів звуків, та кодері з використанням лінійного передбачення. Для другої групи характерним є те, що втрата різних бітів мовного кадру по-різному впливає на розбірливість на прийомі. Біти, які відповідають за кодування параметра „тон-шум”, параметрів формант є більш важливими за ті, що кодують тембральні складові мови,

міжформантні області спектра звуку, параметри шумового збудження або комфортного шуму [6]. Ця питома вага і лежить в основі процедури ранжування бітів. Наприклад, у стандарті стільникового зв'язку GSM символи на виході кодера мови RPE-LTP поділяються за важливістю [7] (для відтворення мови на прийомі), від чого залежить ступінь їх завадостійкого кодування – більш критичні символи підлягають більш потужному кодуванню.

Розглянемо спочатку випадок, коли використовується друга група методів АЦП.

На етапі проектування необхідно провести ранжування символів на виході кодера мови за питомою вагою на розбірливість при відтворенні. В процесі встановлення зв'язку на радіолінії на першому етапі слід оцінити сигнальну й завадову обстановку в каналі. При цьому одним з основних завдань при проектуванні систем і засобів радіозв'язку є вибір придатного алгоритму оцінювання стану каналу зв'язку [8]. У випадку дії в каналі завади у відповідь необхідно

визначити часовий інтервал протягом частотного елемента, який встигає „наздогнати” заваду. В залежності від коефіцієнта перекриття відбираються найменш уразливі для розбірливості символи і розташовуються в потенційно уражених часових ділянках (назвемо цю процедуру перемешуванням джерела), інші зберігають порядок слідування і підлягають каналному перемешуванню з урахуванням тривалості завмирань, яка також визначається на першому етапі.

Розглянемо приклад. Нехай, на виході мовного кодера формуються кадри тривалістю n символів. Позначимо ці символи c_i , де індекс i відповідає порядковому номеру біта на виході кодера в кадрі. Символи, позначені зі штрихом c'_i позначають відібрані найменш важливі, які розташовуються наприкінці частотного елемента, де очікується прихід завади.

Візьмемо для прикладу мінімальну тривалість кадру – 2,5 мс. Щоб передавати рівно один кадр на одному частотному елементі швидкість перестройки повинна бути $v_{\text{пер}} = 1/0,0025 = 400$ стр/с (рис. 3).

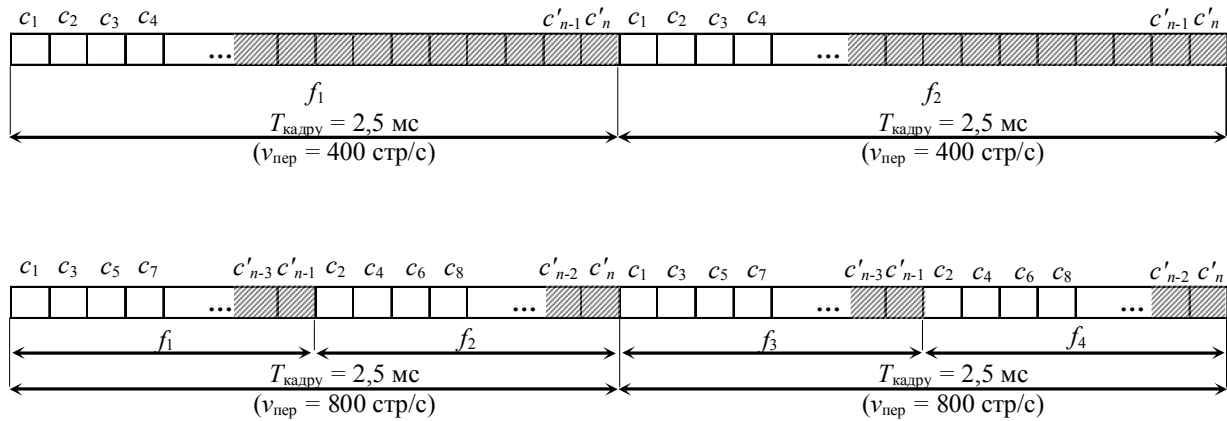


Рис. 3. Приклад перемешування джерела

Задача полягає у тому, щоб забезпечити таку комбінацію швидкості перестройки та схеми перемешування, при якій втрачена частина кадру не впливає суттєво на розбірливість прийнятої мови.

Якщо такої швидкості недостатньо і якість мови на прийомі незадовільна – необхідно підвищувати $v_{\text{пер}}$, причому так, щоб її величина була кратною тривалості кадру, наприклад, вдвічі ($v_{\text{пер}} = 800$ стр/с), як показано на рис. 3. Тоді перекодування повинне охоплювати два частотні елементи – найважливіші біти розташовуються на початку частотних елементів сигналу ППРЧ (f_1, f_2 і т.д.), найменш важливі – в кінці. Найпростіший варіант – попарно: непарні – у першому ($c_1, c_3, \dots, c'_{n-1}$), парні – у другому частотному елементі (c_2, c_4, \dots, c'_n). При необхідності – швидкість перестройки потроюється і т.д. Звичайно, ця ітераційна процедура обмежується максимально можливою швидкістю перестройки.

Блок-схема алгоритму реалізації запропонованого способу при передачі мови вокодерними методами представлена на рис. 4.

Зрозуміло, що при подальшому застосуванні

каналного перемешування, потрібно виключити позиції, де очікується прихід завади у відповідь, і де уже розташовані найменш уразливі з погляду розбірливості мови символи. Слід врахувати, що ППРЧ сама по собі частково реалізує каналне перемешування, оскільки перехід на нову частоту зменшує ймовірність виникнення завмирань, що діють протягом значного інтервалу часу.

Розглянемо випадок використання кодера CVSD. Біти на виході мовного кодера мають однакову цінність для розбірливості мови, проте пачки помилок можуть призводити до втрати окремих звуків чи складів, у той же час, окремі втрачені біти за рахунок адаптивності дельта-модуляції, можуть навіть не проявитися на якості відтворення мови.

Тому доцільним є максимальне розосередження останніх по усій тривалості частотного елемента і виключення символів, що опинилися у його кінці зі схеми каналного перемешування (тоді символи, які будуть подавлені завадою при декодуванні опиняться максимально розосередженими на тривалості частотного елемента).

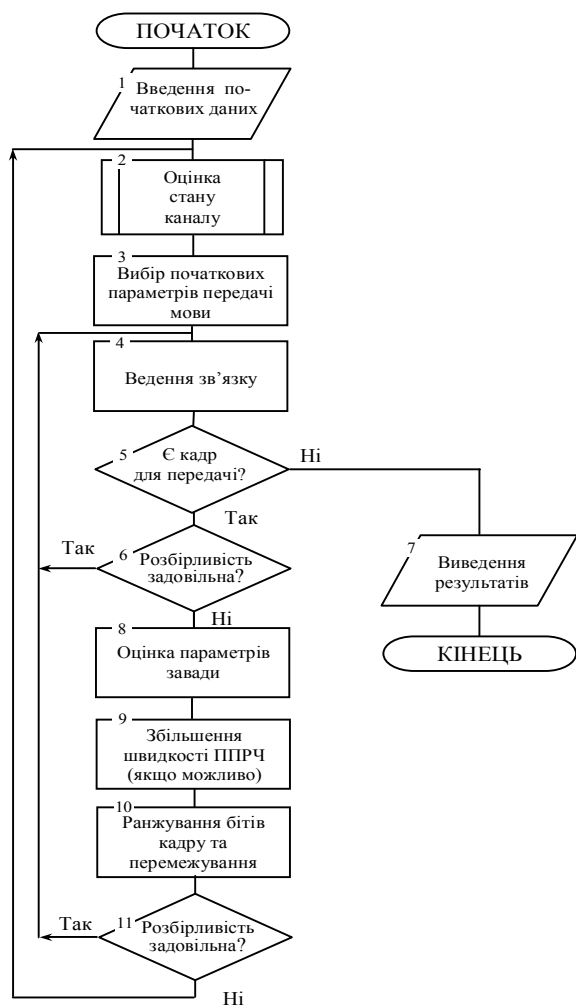


Рис. 4. Блок-схема алгоритму реалізації перемешування джерела

Крім цього, існуючий стандарт CVSD можна доповнити механізмом інтерполяції розосереджених втрачених символів, оскільки відліки мовного сигналу мають значний статистичний взаємозв'язок. Інтерполяція в даному випадку означає, що рішення про значення символів, спотворених завадою, виносяться в демодуляторі як середнє між попереднім та наступним (між двома одиницями буде одиниця, між двома нулями – нуль, для випадків переходу з „1” в „0” і навпаки слід розробити додаткові правила винесення рішення, що враховували б статистику конкретного мовного сегменту).

Передача даних. При передачі даних, а точніше файлів не у реальному режимі часу, в залежності від коефіцієнта перекриття можливі декілька варіантів способу реалізації перемешування джерела.

При незначній кількості уражених бітів доцільним є застосування достатньо високошвидкісних завадостійких кодів в комбінації з перемешуванням на тривалості частотного елемента, при значній – доцільно пожертвувати частиною пропускну спроможності. Це пояснюється тим, що оскільки передача у пакетному режимі передбачає повторну передачу пакетів, прийнятих з помилками, то намагання передавати корисну інформацію у потенційно уражених

завадою проміжках часу призведе до додаткової завантаженості каналу. Тому в цьому випадку необхідно або взагалі не передавати корисної інформації в кінці частотного елемента протягом тривалості завади, або здійснювати перемешування джерела так, щоб біти одного пакета (яким поки що жертвують) виявилися розташованими у кінцях кількох частотних елементів, які „наздоганяє” завада у відповідь.

Висновки

Таким чином, одним з найбільш ефективних методів боротьби з навмисними завадами є псевдовипадкова перестройка робочої частоти. В статті запропоновано спосіб формування сигналу при передачі мови та даних багатопроменевими каналами зв'язку з навмисними завадами у відповідь, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації засобами радіозв'язку з ППРЧ. Суть способу зводиться до розосередження у часі сусідніх символів інформаційного сигналу з урахуванням важливості цих символів, співвідношення часу дії завади, швидкості передачі в каналі та тривалості інформаційного кадру або пакету.

Напрямок подальших досліджень є формалізація запропонованого способу для програмної реалізації та оцінка його ефективності при застосуванні для різних типів мовних кодеків, в залежності від відстані до станції завад, використовуваних схем завадостійкого кодування та інших вихідних даних.

Список літератури

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 – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
2. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: РадиоСофт, 2008. – 260 с.
3. 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.
4. Кувшинов О.В. Вибір параметрів системи рухомого радіозв'язку з ППРЧ при впливі ретрансльованої завади / О.В. Кувшинов, В.І. Глуцький, С.П. Лівенцев // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2003. – Вип. 6. – С. 68-73.
5. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – 2-е изд. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
6. Гурський Т.Г. Аналіз методів кодування мови для використання в радіомережах з пакетною комутацією / Т.Г. Гурський // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2013. – № 1. – С. 13-23.
7. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И. Попов. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
8. Толюпа С.В. Аналіз методів оцінювання параметрів багатопроменевих каналів зв'язку / С.В. Толюпа, Т.Г. Гурський, О.І. Восколович // Вісник ДУІКТ. – 2011. – Т. 9 (3). – С. 194-204.

Надійшла до редколегії 15.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЛИНИЙ
С ППРЧ В УСЛОВИЯХ ОТВЕТНЫХ ПОМЕХ**

Т.Г. Гурский

Предложен способ формирования сигнала при передаче речи и данных многолучевыми каналами связи с преднамеренными ответными помехами, позволяющий повысить достоверность передачи информации средствами радиосвязи с ППРЧ. Идея способа состоит в рассредоточении во времени соседних символов информационного сигнала, подвергающихся воздействию помехи.

Ключевые слова: система радиосвязи, помехозащищенность, псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ), помеха в ответ, чередование.

**INCREASING OF ANTIJAMMINGNES OF RADIO COMMUNICATION LINES
WITH FREQUENCY HOPPING IN CONDITIONS OF JAMMING IN ANSWER**

T.G. Hurskyy

The way of signal's forming when voice and data transmits under the multipath channels in conditions of jamming in answer is proposed. The way allows to increase the probability of information's transmittion by radio communication means with frequency hopping mode. The idea of way consist of time interleaving of neighboring symbols of information signal, that have get under the influence of jam.

Keywords: system of radio contact, antijammingnes, pseudocasual alteration of working frequency, hindrance in reply, alternation.