

Зв'язок

УДК 621.391

Т.Г. Гурський, О.В. Кривенко

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ В РАДІОЗАСОБАХ З ППРЧ ПРИ ПЕРЕДАЧІ МОВИ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАВАД У ВІДПОВІДЬ

Запропоновано методику формування сигналу в радіозасобах з ППРЧ, що дозволяє підвищити розбірливість при передачі мови каналами радіозв'язку в умовах навмисних завад у відповідь. Сутність методики полягає у такому розташуванні символів мовних кадрів на інтервалі частотних елементів сигналу з ППРЧ, при якому завада у відповідь вражає найменш важливі для відтворення мови символи.

Ключові слова: засоби радіозв'язку, радіолінія, завадозахищеність, псевдовипадкова перестройка робочої частоти (ППРЧ), завада у відповідь, розбірливість мови.

Вступ

У сучасних військових системах радіозв'язку для підвищення завадозахищеності широко використовується режим псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ). У цьому режимі передавач і приймач одночасно за невідомим постановнику завад псевдовипадковим законом змінюють робочу частоту. При цьому тривалість роботи радіозасобів на одній частоті називається тривалістю частотного елемента сигналу [1].

Аналіз останніх публікацій. Аналізу та вдосконаленню систем радіозв'язку (СРЗ) з ППРЧ присвячено багато досліджень, які систематизовано у роботах [1–3]. Зокрема, ці видання містять результати досліджень завадостійкості радіоліній з ППРЧ при впливі різних видів навмисних завад. При використанні режиму ППРЧ для СРЗ однією із самих несприятливих є завада у відповідь [4]. При використанні режиму ППРЧ успішність функціонування радіоліній залежить, значною мірою, від технічних можливостей засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) противника, а також від швидкості перестройки частоти. Відомо, що необґрунтоване завищення швидкості перестройки призводить до зменшення дальності зв'язку [1, 5].

Існуючі засоби радіозв'язку (ЗРЗ) з ППРЧ працюють з декількома фіксованими значеннями швидкості стрибків, що перемикаються операторами вручну (наприклад, в УКХ радіостанціях виробництва Harris – 100, 300 та 1000 стр/с) [5]. Таким чином, можна стверджувати, що рівень адаптації параметрів ЗРЗ з ППРЧ до завадової обстановки в каналі є недостатнім і не дозволяє максимально ефективно використовувати можливості по збільшенню дальності зв'язку при передачі мови або даних або по збільшенню пропускної спроможності (в режимі

передачі даних). У той же час, 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.

Відомо, що для параметричних або гібридних кодеків, які широко використовуються для передачі мови у сучасних ЗРЗ [6], різні символи (біти) мовних кадрів мають різний ступінь впливу на розбірливість мови на прийомі [7]. Критерії оцінки розбірливості наведено в [6]. Зокрема, у стандарті GSM [8] сегменти мови тривалістю 20 мс кодується 260 бітами, які поділяються на два класи: 182 біти які підлягають каналному кодуванню та 78, які не захищаються від помилок. Крім цього, біти першого класу поділяються на 2 підкласи, перший з яких (50 біт) підлягає більш потужному кодуванню. Очевидно, що при впливі завади у відповідь ймовірність помилкового приймання значно зростатиме наприкінці частотного елемента сигналу.

Метою статті є розробка методики формування сигналу військових засобів радіозв'язку в режимі ППРЧ для підвищення розбірливості відтворення мови в умовах впливу навмисних завад у відповідь. Основними параметрами, значення яких можуть змінюватись протягом сеансу зв'язку, є швидкість перестройки частоти та черговість слідування інформаційних символів на інтервалах частотних елементів сигналу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сутність методики полягає у такому розташуванні символів на виході мовного кодера з урахуванням їх важливості на якість відтворення мови,

співвідношення часу дії завади у відповідь, тривалості мовного кадру та частотного елемента сигналу з ППРЧ, що зменшує вплив втраченої частини символів на розбірливість мови на прийомі.

Вихідні дані: режим роботи ЗРЗ – ППРЧ; максимальна швидкість перестройки частоти – $v_{\text{пер. макс}}$; мінімальна швидкість перестройки частоти – $v_{\text{пер. мин}}$; тип АЦП мови – параметричний; тип навмисної завади – завада у відповідь (коефіцієнт перекриття корисного сигналу – ρ).

Обмеження: постановник завад використовує тільки заваду у відповідь; час реакції постановника завади $\Delta T_{\text{СПР}}$ – до 100 мкс; в каналі за відсутності навмисних завад забезпечується ймовірність помилкового приймання сигналів $P_6 < 10^{-3}$; завадостійке кодування та каналне перемежування сигналу в роботі не розглядаються, передбачається, що отримані результати дають вигоду додатково до них.

Допущення: пристрій оцінювання стану каналу дозволяє ідентифікувати наявність завади у відповідь в каналі зв'язку та визначити її параметри (спектральну щільність потужності $S(f)$ та коефіцієнт перекриття ρ); в процесі ведення зв'язку радіозасоби мають канал зворотного зв'язку, яким передається необхідна інформація для управління вибором значень параметрів сигналу ППРЧ; на етапі проектування ЗРЗ проведено ранжування символів мовного кадру на виході кодера за питомою вагою їх втрати на розбірливість мови при відтворенні на прийомі (ранжування може проводитись як на основі раніше отриманих статистичних даних та досліджень, так і на основі спеціально проведеного моделювання).

Необхідно: забезпечити максимально можливе значення розбірливості при відтворенні мови на прийомі.

Методика формування сигналу радіозасобів з ППРЧ при передачі мови в умовах завад у відповідь, алгоритм реалізації якої представлений на рис. 1, складається з таких етапів.

1. Введення вихідних даних (блок 1). На етапі проектування ЗРЗ здійснюється ранжування символів мовних кадрів за ступенем їх важливості на якість відтворення мови. Враховується, що втрата (прийом з помилкою) молодших розрядів кодових комбінацій, які переносять значення відповідних параметрів звуків, призведе до менших спотворень при відтворенні мови, ніж втрата старших розрядів. Крім цього, на етапі проектування визначається мінімальне та максимальне значення швидкості перестройки та крок її зміни. На етапі оперативного управління параметрами ЗРЗ до вихідних даних належать налаштування каналів для роботи у режимі ППРЧ (мінімальна та максимальна частота смуги ППРЧ, початкова швидкість перестройки частоти).

2. Встановлення зв'язку (блоки 2, 3). Один з кореспондентів радіомережі виходить на передачу та ініціює сеанс зв'язку. Сеанс може розпочинатися з будь-яким із можливих значень швидкості перестройки частоти, в залежності від обраного оператором каналу.

3. Оцінка завадової обстановки в каналі зв'язку (блок 4). В процесі встановлення зв'язку на радіолінії оцінюється сигнальна й завадова обстановка в каналі. Тому одним з основних завдань при проектуванні систем і засобів радіозв'язку є вибір додатного алгоритму оцінювання стану каналу зв'язку, детальний аналіз яких проведено в статті [9].

У випадку дії в каналі завади у відповідь необхідно визначити часовий інтервал протягом частотного елемента, який встигає „наздогнати” заваду. Радіостанціями на прийомі здійснюється ідентифікація завади у відповідь за допомогою прямих методів оцінювання стану каналу (за рахунок різкого збільшення рівня прийнятого сигналу протягом тривалості частотного елемента сигналу). Очевидно, що значення коефіцієнта перекриття ρ будуть відрізнятися для різних частотних елементів, в залежності від того, наскільки швидко станція радіотехнічної розвідки виявлятиме факт роботи радіолінії на новій частоті. Останнє, в свою чергу, залежить від відстані на частотній осі між новою робочою частотою радіолінії та частотою, з якої починає сканування діапазону (ділянки діапазону) приймач станції радіотехнічної розвідки [1, 10]. Тому рішення про величину коефіцієнта перекриття доцільно приймати за його максимальним значенням, отриманим протягом часу спостереження (на найгірший випадок).

4. Вибір необхідної швидкості перестройки частоти (блоки 5-10).

4.1. Якщо $\rho > 0$, то для усунення впливу завади у відповідь необхідно збільшити швидкість стрибків на мінімально необхідну величину (щоб отримати $\rho = 0$).

4.2. Якщо пристрій оцінки каналу виявляє заваду у відповідь, але вона приходить зі значним запізненням (умовно вважаємо, що $\rho < 0$), то швидкість перестройки частоти зменшується до допустимого значення ($\rho = 0$).

5. Зміна порядку слідування символів на інтервалі обробки (блок 11). Блок управління формуванням сигналу ППРЧ на основі інформації про питому вагу кожного символу на виході кодера мови, отриманої на етапі проектування засобу радіозв'язку, з урахуванням поточного значення частотного елемента сигналу, здійснює перерозподіл символів протягом тривалості частотного елемента таким чином, щоб найбільш важливі для відтворення мови символи знаходились на початку частотного елемента, найменш важливі – в кінці. При цьому, враховуючи, що допустиме значення затримки при

передачі мови складає 250 мс [11], доцільно застосувати процедуру перерозподілу черговості слідування символів у межах тривалості декількох мовних кадрів з урахуванням алгоритмічної затримки кодека. Назвемо цей параметр інтервалом обробки.

Правила (алгоритм) роботи блоку управління формуванням сигналу ППРЧ повинні бути однозначними і призводити до симетричних перетворень як при формуванні сигналу на передачі, так і при його обробці на прийомі.

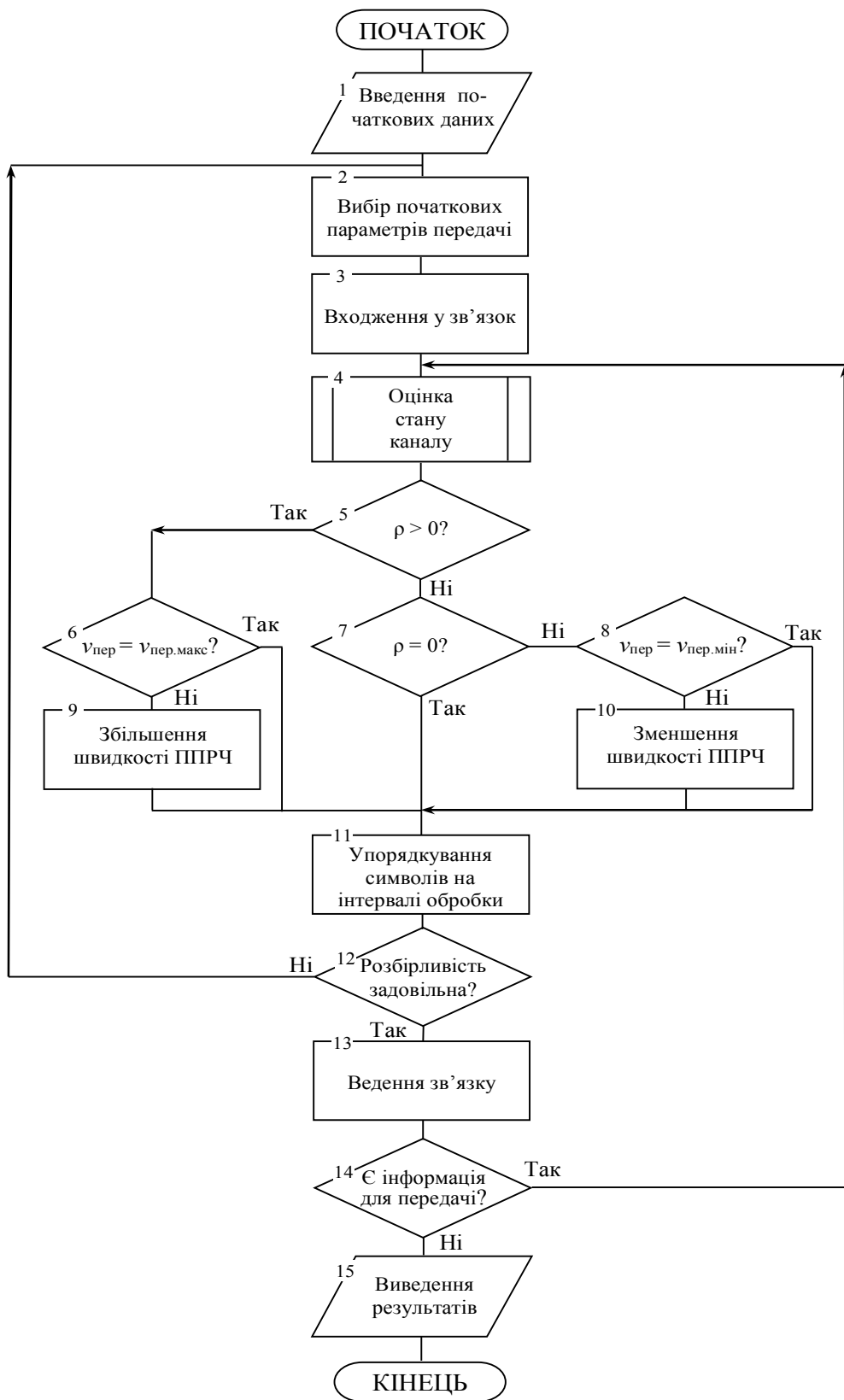


Рис. 1. Блок-схема алгоритму реалізації методики

Крім цього, для реалізації п'ятого етапу методики, необхідно передбачити можливість передачі від приймача до передавача значення коефіцієнта перекриття – або при натисканні на тангенту (оскільки при веденні розмови кореспонденти, як правило, по черзі обмінюються голосовими повідомленнями), або (для підвищення оперативності) одразу при прийнятті рішення про наявність на вході приймача навмисної завади у відповідь. В другому випадку необхідно виділити короткочасні інтервали для реалізації зворотного зв'язку між приймальним та передавальним кінцями радіолінії, протягом яких буде забезпечуватися запирання передавача для можливості прийому запитів на зміну параметрів передавача при натиснутій тангенті. Очевидно, як наслідок, результуюча швидкість передачі в каналі дещо збільшиться.

Після успішної передачі значення ρ блоки управління формуванням сигналу ППРЧ передавача та приймача радіолінії починають синхронно змінювати порядок слідування бітів мовних кадрів в каналі зв'язку.

Додатковий вииграш у якості відтворення мови може бути отримано за рахунок використання завадостійкого кодування та каналного перемежування. При реалізації перемежування слід враховувати, що сусідні символи інформаційного кадру вже розосереджені на інтервалі обробки, крім цього, несуча частота постійно змінюється, що також дозволяє боротися з явищем групування помилок. Завадостійке кодування доцільно застосовувати з урахуванням питомої ваги помилки при прийомі символу на якість відтворення мови (як і у стандарті GSM [8]). Також, якщо використовувати на передачі детектор мовної активності [6], за наявності пауз у мові на інтервалі обробки, в першу чергу, саме символи, що відповідають паузам, потрібно розподіляти в уражені завадами ділянки частотних елементів сигналу.

6. Ведення зв'язку (блоки 12-14). В процесі ведення сеансу зв'язку аж до його закінчення значення ρ контролюється за допомогою пристрою оці-

нювання каналу зв'язку (блок 4). Якщо один з об'єктів (радіостанції або постановники завод) перебувають у русі, або станція завод почала працювати більш ефективно (значення ρ зростає), наприклад, після того, як замість декількох цілей (радіомереж) зосередилась на одній, або менш ефективно (у зворотній ситуації), необхідно змінювати відповідним чином швидкість стрибків частоти та порядок слідування інформаційних символів протягом частотних елементів сигналу з ППРЧ (блоки 5-11).

Якщо навіть при максимальній швидкості стрибків частоти та після упорядкування символів на інтервалі обробки розбірливість мови незадовільна (блок 12), необхідно змінювати тип кодека мови (на менш низькошвидкісний) або переходити до низькошвидкісної передачі даних, наприклад, передачі коротких текстових повідомлень (блок 2).

Приклад застосування. На рис. 2 показано приклад, коли початкова швидкість перестройки частоти дорівнює половині максимально можливої (рис. 2, а), і завада у відповідь перебиває більшу частину частотного елемента, що унеможливило ведення голосового зв'язку. Тому за запитом приймальної сторони (передається на ділянці частотного елемента, яку не встигає наздогнати завада у відповідь) здійснюється перехід до максимального значення швидкості перестройки. На рис. 2 позначено: f_i – частотні елементи сигналу ППРЧ; заштриховані ділянки – час, протягом якого завада у відповідь впливає на інформаційні символи; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n\}$ – множина символів, що підлягають передачі в канал зв'язку, яка включає символи з виходу мовного кодера, службові символи та перевіірочні (завадостійкого кодування); n – кількість символів на інтервалі обробки. На основі процедури ранжування символів мовного кадру, проведеної на етапі проектування, проводиться упорядкування символів на інтервалі обробки – множина C перетворюється у множину C' ($C' = \{c'_1, c'_2, \dots, c'_i, \dots, c'_n\}$), для якої зі зростанням n зменшується питома вага втрати символу для якості відтворення мови.

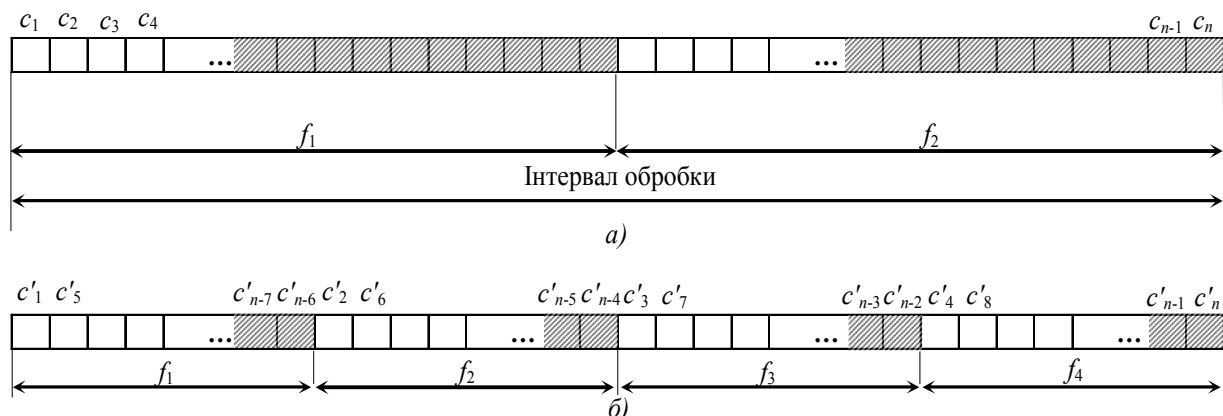


Рис. 2. Приклад зміни швидкості перестройки частоти та перерозподілу порядку слідування символів на інтервалі обробки

Блок управління формуванням сигналу ППРЧ розташовує на ділянках частотних елементів, потенційно вражених завадами, символи множини S' з найбільшими (найбільш близькими до n) значеннями індексів (рис. 2б).

Оцінка ефективності. Розглянемо застосування запропонованої методики на прикладі кодека MELP зі швидкістю 2400 біт/с (MELP-2400).

Обраний вокодер забезпечує добру якість звучання синтезованої мови за величини бітової помилки не більше 1% і мінімально необхідну для сприйняття – при значенні відповідного параметра, не більше 4-5 %.

Кодек MELP заснований на традиційній параметричній моделі кодування з лінійним передбаченням (LPC), але, крім того, містить п'ять додаткових особливостей: змішане збудження; використання аперіодичних імпульсів; адаптивне поліпшення спектрального оцінювання; „розмивання” імпульсів збудження; моделювання амплітуд коефіцієнтів Фур'є.

Детальний опис роботи кодека MELP наведено в [12]. Перелік параметрів, що передаються від кодера до декодера, представлений в табл. 1.

Таким чином, на виході кодера MELP-2400 формуються інформаційні кадри тривалістю 22,5 мс, що містять 54 біти, які кодують 8 груп параметрів мови, причому втрата (помилкове приймання) бітів, що належать до різних груп має різний ступінь впливу на якість відтворення мови. Наприклад, амплітуди перетворення Фур'є сигналу збудження відповідають за природність мови та передачу інтонації голосу людини [13]. Очевидно, що їх втрата практично не вплине на розбірливість мови. Крім цього, можна без суттєвих для розбірливості втрат використовувати одне з двох значень коефіцієнта підсилення за кадр. Таким чином, з урахуванням статистики використання вокалізованих та невокалізованих звуків для української мови [14], можна стверджувати, що в середньому понад 7-8 строго визначених з 54 символів кадру (близько 14%) може бути

втрачено без істотного впливу на розбірливість переданої мови.

Таблиця 1

Символи мовного кадру для MELP-2400

Параметри	Озвучений	Неозвучений
Лінійні спектральні частоти	25	25
Амплітуди перетворення Фур'є	8	-
Коефіцієнти підсилення, 2 за кадр	8	8
Період основного тону, загальна озвученість кадру	7	7
Озвученість по смугам	4	-
Прапор неперіодичності	1	-
Захист від помилок	-	13
Синхробіт	1	1
Всього бітів за кадр 22,5 мс	54	54

Результати моделювання роботи радіолінії у режимі ППРЧ в умовах впливу завади у відповідь наведено на рис. 2. Видно, що з використанням запропонованої методики прийнятна якість передачі мови (приблизно 2 бали за шкалою MOS [6]) в радіолінії з ППРЧ забезпечується при значеннях коефіцієнта перекриття до 24-28 % (втрата 12-14% бітів при достатньо високій спектральній щільності потужності завади на вході приймача), у той же час, для стандартного кодека MELP якість мови стає незадовільною уже при значеннях коефіцієнта перекриття близько 10% (втрата приблизно 5 % бітів).

У випадку, коли коефіцієнт перекриття завадою у відповідь частотного елемента сигналу перевищує допустиме значення (близько 0,3), доцільно переходити до передачі мови з використанням кодека MELP зі швидкістю передачі 1200 біт/с. Запропонована методика і реалізує по суті поступовий перехід від MELP-2400 до MELP-1200.

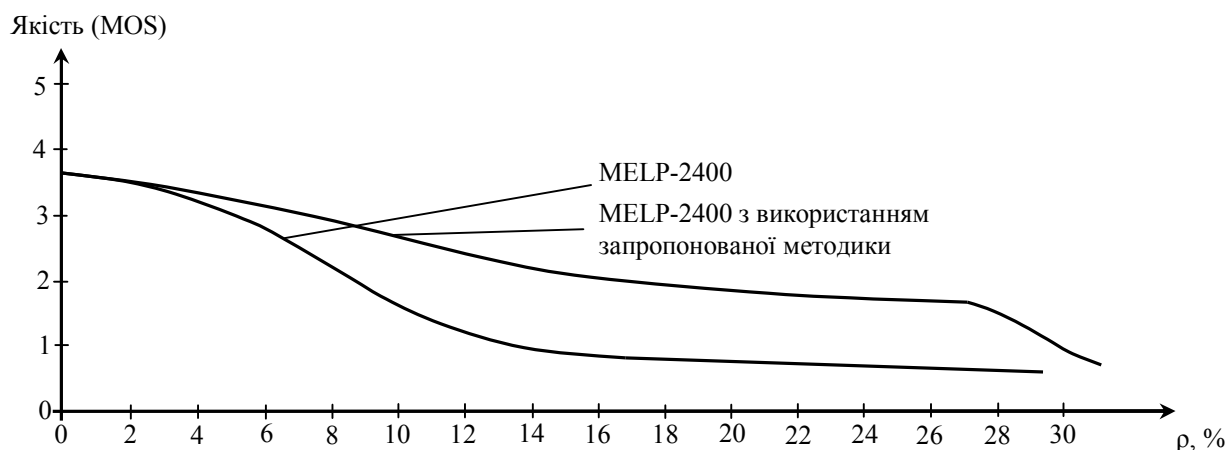


Рис. 2. Якість відтворення мови при впливі завади у відповідь

При неможливості передачі мови зі швидкістю 1200 біт/с через високий коефіцієнт перекриття, наступним кроком може бути перехід до використання кодека MELP-600.

Висновки

Таким чином, у статті запропоновано методику формування сигналу у військових радіозасобах з ППРЧ, що дозволяє при використанні параметричних методів кодування мови підвищити якість її відтворення на прийомі в умовах впливу навмисних завад у відповідь. Це досягається за рахунок такого розташування символів мовних кадрів на тривалості частотних елементів сигналу, при якому на ділянках, що потенційно можуть бути уражені завадами, розташовуються символи, втрата яких призводить до меншого рівня спотворення синтезованої на прийомі мови у порівнянні з помилковим прийманням інших символів.

Напрямок подальших досліджень є розробка методики формування сигналу з ППРЧ при впливі навмисних шумових завад та у режимі пакетної передачі 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. Кувишинов О.В. Вибір параметрів системи рухомого радіозв'язку з ППРЧ при впливі ретрансльованої завади / О.В. Кувишинов, В.І. Глуцький, С.П. Лівенцев // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2003. – Вип. 6. – С. 68–73.

5. Напрямки вдосконалення засобів радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти / [Гурський Т.Г., Жук О.Г., Кривенко О.В., Шишацький А.В.] // Збірник наукових праць ВІТІ, 2016. – Вип. 1. – С. 25–34.

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. Гурський Т.Г. Підвищення завадозахищеності радіолінії з ППРЧ в умовах завад у відповідь / Т.Г. Гурський // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2014. – № 3 (40). – С. 58–63.

8. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / В.И. Попов. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.

9. Толюпа С.В. Аналіз методів оцінювання параметрів базатромонових каналів зв'язку / С.В. Толюпа, Т.Г. Гурський, О.І. Восколович // Вісник ДУІКТ. – 2011. – Т. 9 (3). – С. 194–204.

10. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – 2-е изд. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.

11. 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. – P. 106–118.

12. U.S. Department of Defense, Analog to digital conversion of voice by 2,400 bit/second mixed excitation linear prediction, 1998.

13. Выборнов С.В. Практическая реализация низкоростных вокодеров для каналов с высоким процентом ошибок / С.В. Выборнов, Н.А. Сидорова // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова, серия Цифровая обработка сигналов и ее применение / 10-я Международная выставка и конференция. – Выпуск X-1. – Москва: ООО „Инсвязиздат”, 2008. – С. 225–228.

14. Іщенко О.С. Голосні звуки української мови залежно від темпу мовлення: монографія / О.С. Іщенко. – К.: Інститут укр. мови НАН України, 2012. – 220 с.

Надійшла до редколегії 15.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.О. Романенко, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА В РАДИОСРЕДСТВАХ С ППРЧ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ РЕЧИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХИ В СЛЕД

Т.Г. Гурский, А.В. Кривенко

Предложена методика формирования сигнала в радиосредствах с ППРЧ, позволяющая повысить разборчивость передачи речи по каналам радиосвязи в условиях преднамеренных ответных помех. Сущность методики заключается в таком расположении символов речевых кадров на интервале частотных элементов сигнала с ППРЧ, при котором ответная помеха поражает наименее важные для воспроизведения речи символы.

Ключевые слова: средства радиосвязи, радиолиния, помехозащищенность, псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ), помеха в след, разборчивость речи.

METHOD THE FORMING SIGNAL OF RADIO COMMUNICATION WITH FHSS MODE VOICE UNDER INFLUENCE OF NOISE RESPONSE

T.G. Gurski, A.V. Krivenko

The methods of signal's forming in means of radio communication in frequency hopping (FH) mode are offered. The methods allow promoting legibility of transmission of speech on the radio communication channels with return intentional hindrances. Essence of methods consists in such location of symbols of speech shots on the intervals of frequency elements of FH signal, at that a return hindrance strikes symbols, which are the least important for speech reproducing.

Keywords: radio communications, radio link, interference, frequency-hopping spread spectrum (FHSS), an obstacle in the trail, the intelligibility of speech.