

УДК 621.396

М.Ю. Яковлев, Л.Л. Бортнік

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ MC-CDMA-СИГНАЛУ ВІЙСЬКОВИХ ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СТАНУ КАНАЛУ

У статті запропоновано методику управління параметрами MC-CDMA-сигналу військових засобів радіозв'язку в залежності від стану каналу, сутність якої полягає в адаптивному виборі значень параметрів MC-CDMA-сигналу військових засобів радіозв'язку, оптимальних за критерієм максимуму показника енергетичної ефективності при заданій пропускну́й спроможності.

Ключові слова: військові засоби радіозв'язку, широкосмугові сигнали, псевдовипадкові послідовності, MC-CDMA-сигнал.

Вступ

Постановка проблеми. Однією з тенденцій розвитку тактики загальновійськового бою є широке застосування засобів радіоелектронної боротьби. У військових доктринах багатьох розвинених держав значна увага приділяється завоюванню ініціативи й переваги в інформаційному й повітряно-космічному просторі, а потім вже на морі й суші. Сучасні засоби радіоелектронного подавлення здатні з високою ефективністю та у короткий час подавити військову систему радіозв'язку, побудовану на традиційних принципах [1 – 4]. Враховуючи це, стає досить складним завдання забезпечення стійкого радіозв'язку в умовах активного радіоелектронного подавлення.

Аналіз літератури. У сучасних системах радіозв'язку широко використовується технологія MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access). Технологія MC-CDMA являється перспективною і знайшла широке застосування в безпроводних мережах зв'язку цивільного призначення. Але системам військового радіозв'язку характерне функціонування при використанні противником навмисних завад. Аналіз характеристик навмисних завад, які можуть створювати сучасні комплекси та засоби радіоелектронного подавлення, показав, що особливу небезпеку для систем радіозв'язку з цифровою модуляцією представляють ретрансльовані та імітаційні дезінформуючі завади [5, 6].

Мета статті: Розробити методику управління параметрами MC-CDMA-сигналу військових засобів радіозв'язку в залежності від стану каналу.

Основний матеріал

Розглянемо більш детально методику управління параметрами MC-CDMA-сигналу військових засобів радіозв'язку в залежності від стану каналу. Сутність запропонованої методики полягає у адаптивному виборі значень параметрів MC-CDMA-сигналу військових засобів радіозв'язку, оптималь-

них за критерієм максимуму показника енергетичної ефективності при заданій пропускну́й спроможності.

Нехай задано: P_c – потужність сигналу, M – розмірність ансамблю сигналів, R – швидкість коректувального коду ($R = k/n$), k – кількість інформаційних біт в кодовій комбінації довжиною n , L – тривалість розширювальної послідовності; N – кількість піднесучих, ΔF – ширина смуги частот каналу, T_c – період сигналу. Значення $\Delta F, T_c$ є постійними.

Необхідно визначити значення параметрів сигналу (кількість активних піднесучих, вид і параметри сигнально-кодової конструкції (СКК), параметри розширювальної послідовності та потужність передавача), при яких максимізується енергетична ефективність β_E при виконанні обмежень на швидкість передавання в каналі $v_i \geq v_{i \text{ доп}}$.

Приймемо наступні обмеження:
 вид коригувального коду – турбо коди зі швидкістю $R = 0,5-0,9$; довжина кодової комбінації $n \leq 255$;
 величина кодової відстані $3 \leq d \leq 19$;
 вид модуляції – квадратурна амплітудна модуляція;
 розмірність ансамблю сигналів $2 \leq M \leq 256$;
 кількість піднесучих MC-CDMA-сигналу $4 \leq N \leq 128$.

Завдання визначення параметрів MC-CDMA-сигналу з максимальними показниками енергетичної ефективності зводяться до типової оптимізаційної задачі.

Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд [7]:

$$\begin{cases} \beta_E = F_1(M, R, P_c, N, L) \rightarrow \max; \\ v_i = F_2(M, \Delta F, R, N) \geq v_{i \text{ доп}}. \end{cases} \quad (1)$$

Розкриємо функціонали системи рівнянь (1). Інформаційна швидкість визначається як [7]

$$v_i = \frac{B}{T_c} = \frac{N \cdot \log_2 M \cdot R}{T_c}, \quad (2)$$

де T_c – тривалість сигналу; V – кількість інформаційних біт, що передається в одному MC-CDMA-символі. У разі застосування адаптивного розподілу потужності передавача відношення сигнал/завада на вході приймача у всіх підканалах вирівнюються та приймають значення Q_{cp}^2 . Визначимо значення усередненого між усіма підканалами відношення сигнал/завада [7]:

$$Q_{cp}^2 = P_c \cdot \frac{k}{n} / \sum_{i=1}^N G_{zi}, \quad (3)$$

де G_{zi} – спектральна щільність потужності шуму в i -му підканалі.

Тоді енергетична ефективність визначається, як

$$\beta_E = v_i / Q_{cp}^2.$$

Ймовірність помилки в формулі (3) при застосуванні коригувального коду визначається виразом [6]:

$$P_{\text{пом кк}} \geq \sum_{j=s_{\text{випр}}+1}^n C_n^j P_{\text{пом}}^j (1-P_{\text{пом}})^{n-j}, \quad (4)$$

де $P_{\text{пом кк}}$ – ймовірність помилкового декодування кодової комбінації; $s_{\text{випр}} = (d-1)/2$ – кратність помилок, яку код виправляє; j – кратність помилки у блоці з n елементів; $P_{\text{пом}}$ – ймовірність виникнення помилок в послідовності переданих кодових елементів; $C_n^j = n! / (j!(n-j)!) –$ біноміальний коефіцієнт, який дорівнює кількості різних сполучень j помилок у блоці з n символів. Значення $P_{\text{пом}}$ визначається видом модуляції сигналу та розраховується з урахуванням швидкості кодування R . Так для сигналів ФМ-4 [7]:

$$P_{\text{пом}} = \left[1 - \Phi \left[\sqrt{2Q_{cp}^2 R} \right] \right], \quad (5)$$

де $\Phi[\dots]$ – функція Крампа [7, 8].

Тоді з урахуванням формул (4) та (5) отримаємо

$$P_{\text{пом кк}} = \sum_{j=(d+1)/2}^n C_n^j \cdot \left[1 - \Phi \sqrt{2Q_{cp}^2} \right]^j \times \left[1 - \left(1 - \Phi \sqrt{2Q_{cp}^2} \right) \right]^{n-j}. \quad (6)$$

З аналізу системи (1) випливає, що її обчислювальна складність в реальному масштабі часу не є прийнятною.

Однак, якщо певним чином змінити порядок розв'язання задачі, бажаний результат можна отримати простіше. Спочатку при фіксованій потужності P_c знаходяться значення параметрів, які забезпечують мінімальне значення v_i . Оскільки значення ΔF та T_c згідно вихідних даних є постійними, тоді функцію v_i в (2) можна замінити на V . Таким чином, система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має такий вигляд:

$$\begin{cases} \beta_E = \frac{N \cdot \log_2(M \cdot R)}{R \cdot T_c \cdot P_c} \rightarrow \max; \quad M = 2^m; \\ v_i = \frac{N \cdot \log_2 M \cdot R}{T_c} \geq v_{i \text{ доп}}; \quad 0, 1 \leq P_c \leq 5; \\ 1 \leq m \leq 8; \quad 0, 5 \leq R \leq 0, 9; \quad 4 \leq N \leq 128; \quad M, m, N \in \mathbb{Z}. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язання представленої задачі умовної дискретної оптимізації доцільно проводити за допомогою направленої перебору допустимих варіантів з використанням ітеративного алгоритму.

Методика управління параметрами MC-CDMA-сигналу військових засобів радіозв'язку в залежності від стану каналу, алгоритм реалізації якої подано на рис. 1, складається з наступних етапів.

1. Введення вихідних даних. Вводяться параметри передавального пристрою і каналу зв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, а також значення мінімально необхідної швидкості передавання $v_{i \text{ доп}}$.

2. Визначення кількості піднесучих та відстані між ними, а також тривалості символу. Відстань між піднесучими MC-CDMA-сигналу вибирається в залежності від наступних параметрів: доплерівського розсіювання спектру; мінімального часу затримок променів (перевідбитих копій сигналу); максимально можливої тривалості символу (часу когерентності параметрів каналу).

Зміщення частоти на 7-8% від відстані між піднесучими призводить до еквівалентного зниження сигнал/завада порядку 1 дБ. Після визначення мінімальної відстані між піднесучими можна розрахувати тривалість символу. Для відстані між піднесучими 50 Гц тривалість символу повинна бути не менше 20 мс.

Мінімальний час затримки між променями визначає ступінь нерівномірності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) каналу. Отже, більший затримці між променями відповідає більший період нерівномірності АЧХ. При максимальній затримці між променями 4 мс, період нерівномірності АЧХ складає 250 Гц. Отже, відстань між піднесучими повинна вибиратися у припущенні, що АЧХ на кожній з них представлятиме собою канал з адитивним білим гаусівським шумом. Відповідно, відстань між піднесучими повинна бути значно меншою за період нерівномірності АЧХ каналу. Тобто, з цієї точки зору відстань між піднесучими потрібно мінімізувати. Для короткохвильового (КХ) каналу відстань у 50 Гц є максимально допустимою, оскільки більші значення відстані між піднесучими призводять до значного спотворення параметрів каналу, внаслідок чого збільшуються спотворення символу.

Інше обмеження на тривалість символу – припущення про те, що параметри каналу повинні бути постійними протягом тривалості символу. Це дає можливість використовувати простий метод оцінки

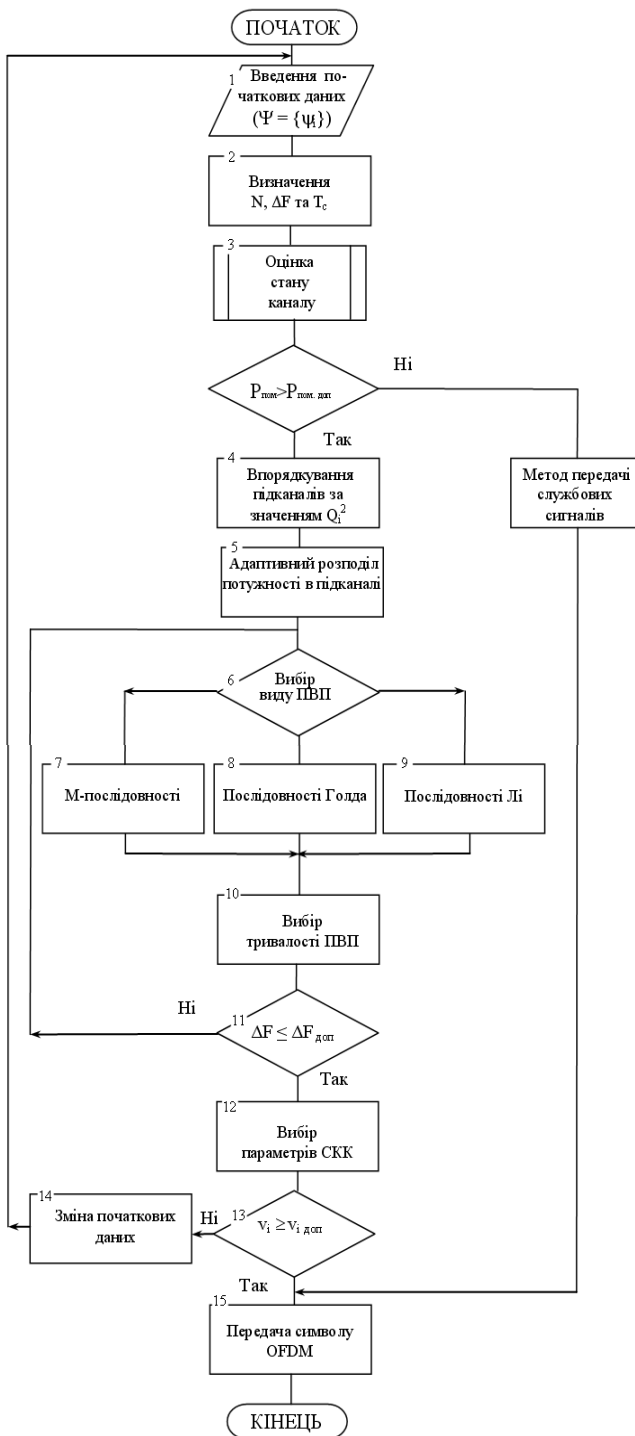


Рис. 1. Схема алгоритму вибору параметрів сигналу військових засобів радіозв'язку OFDM в залежності від стану каналу зв'язку

та компенсації АЧХ каналу в частотній області на кожному символі. Обмеження на тривалість символу в КХ діапазоні можна прийняти порядку сотень мілісекунд.

Визначення кількості піднесучих N повинно проводитись виходячи з інформаційної (та технічної) швидкості групового сигналу з урахуванням необхідності резервування частини пропускної спроможності каналу для різноманітної службової інформації. При

цьому вибирається N з ряду значень, що забезпечуються операцією зворотного швидкого перетворення Фур'є.

Для усунення шкідливого впливу міжсимвольної інтерференції в структуру сигналу вводиться циклічний префікс.

Розмір префікса τ_3 вибирається виходячи зі значень двох параметрів: максимально можливого зсуву у часі між променями; необхідного співвідношення між тривалістю символу без префікса та самого префікса (у випадку коли префікс використовується для знаходження тактової синхронізації).

3. Адаптивний розподіл потужності сигналу в підканалі. На даному етапі за результатами оцінки передаточної характеристики каналу здійснюється присвоєння порядкових номерів кожному підканалі в порядку зменшення відношень сигнал/шум (гірші підканалі мають більші порядкові номери): $Q_1^2 \geq Q_2^2 \geq \dots \geq Q_N^2$.

Після цього відбувається відключення найгірших за відношенням сигнал/шум піднесучих. Відключення піднесучих з низькими відношеннями сигнал/шум зменшує шкідливий вплив частотно-селективних завмирань на пропускну спроможність і дозволяє перерозподілити потужність передавача між іншими піднесучими.

4. Якщо ймовірність помилки $R_{пом}$ більша допустимої $R_{пом, доп}$, використовується метод передачі службових повідомлень.

5. Вибір виду та тривалості розширювальної послідовності. Для боротьби з навмисними завадами (особливо імітаційними) застосовується розширення спектру за допомогою технології розширювальних кодових послідовностей, основними принципами якої являється розширення спектра в поєднанні з кодовим розділенням фізичних каналів за рахунок використання псевдовипадкових послідовностей (ПВП).

6. Для розширення спектра в системах MC-CDMA використовуються різні види розширювальних послідовностей: двійкові (послідовності Уолша, послідовності Шапіро-Рудіна, коди Баркера, коди Голда, М-послідовності, послідовності Адамара) та багатозв'язні (послідовності Френка та Задова-Чу, послідовності Мілевського, послідовності Голея). Нижче розглянемо деякі найбільш ефективні послідовності, що використовуються в даний час. Також в [9] розглянуті 4-фазні послідовності Лі з одним нулем, ідеальні 8-фазні послідовності Люке з одним нулем та ідеальні 8-фазні послідовності з двома нулями.

7. Вибір СКК. У переважній більшості випадків виявляється можливим виділити кілька можливих станів каналу зв'язку [5]. Цим сценарієм у відповідність можуть бути поставлені різні види СКК, які

доцільно вибирати виходячи з параметрів ефективності засобів радіозв'язку при різних рівнях завмирань сигналу з MC-CDMA у каналі зв'язку. Раціональні параметри СКК для різного рівня завмирань сигналу і навмисних завад в підканалі вибираються на етапі проектування.

Оптимізація розглянутого варіанта по швидкості при обмеженій середній потужності сигналу на вході каналу зводиться до вибору оптимального розбиття підканалів на групи з однаковою швидкістю, оптимального вибору позиційності сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією і мінімальної відстані d у них.

У каналах з низьким відношення сигнал/завада найбільш ефективним є застосування турбо кодів [8, 10].

8. Після вибору параметрів сигналу з MC-CDMA перевіряється виконання умови обмеження на швидкість передавання в каналі $v_i \geq v_{i \text{ доп}}$. Якщо ця умова не виконується – відбувається зміна початкових даних.

Висновки

Таким чином, завдання підвищення енергетичної ефективності військових засобів радіозв'язку в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль і активної радіоелектронної боротьби є актуальним і має не тільки теоретичне, але і велике прикладне значення для забезпечення необхідного рівня бойової готовності військ за рахунок підвищення своєчасності, вірогідності та прихованості бойового управління.

Отримані результати оцінки ефективності запропонованої методики показали, що обрані за допомогою розробленої методики раціональні значення параметрів дозволяють підвищити енергетичну ефективність військових засобів радіозв'язку на 14-23 % при різному ступені глибини частотно-селективних завмирань сигналу в каналі зв'язку.

Список літератури

1. Современная радиозлектронная борьба. Вопросы методологии / [Агафонов А. А., Артох С. Н., Афанасьев В. И. и др.]; под ред. В. Г. Радзиевского. – М.: „Радиотехника”, 2006. – 424 с.
2. Палый А. И. Радиозлектронная борьба / А. И. Палый. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
3. Борисов В. И. Помехозащитность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Баушев С. В. Разработка перспективных систем связи вооруженных сил США и Объединенных вооруженных сил НАТО / С. В. Баушев, А. В. Передрий // Зарубежная радиозлектроника. – 2000. – № 7. – С. 3–20.
5. Кондратьев А. Перспективный комплекс РРТР и РЭВ сухопутных войск США „Профет” / А. Кондратьев // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 7. – С. 37–41.
6. Стрелецкий А. Американский перспективный наземный комплекс ведения радиозлектронной войны „Вулфпак” // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 10. – С. 27–28.
7. Теорія електрозв'язку. Підручник: [у 2 т.]. Т. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та розподілу інформації / [О. В. Корнейко, О. В. Кувишинов, О. П. Лежнюк, С. П. Лівенцев]; під ред. С. П. Лівенцева. – К.: НВФ „Славутич-Дельфін”, 2006. – 292 с.
8. Кувишинов О. В. Основи теорії завадостійкого кодування : Навчальний посібник / О. В. Кувишинов, О. П. Лежнюк, С. П. Лівенцев. – К.: ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2001. – 72 с.
9. Кувишинов О. В. Технологія OFDM: огляд проблем та шляхів їх розв'язання / О. В. Кувишинов, Т. Г. Гурський // Зв'язок. – 2008. – № 1. – С. 42–46.
10. Li Y. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels / Y. Li, L. J. Cimini Jr., N. R. Sollenberger // IEEE Trans. Commun. – 1998. – Vol. 46. – P. 902–915.

Надійшла до редколегії 10.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, доцент М.І. Адаменко. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

МЕТОДИКА УПРАВЛЕННЯ ПАРАМЕТРАМИ MC-CDMA-СИГНАЛА ВОЕННЫХ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ КАНАЛА

М.Ю. Яковлев, Л.Л. Бортник

В работе предложена методика управления параметрами MC-CDMA-сигнала военных средств радиосвязи в зависимости от состояния канала, суть которой состоит в адаптивном выборе значений параметров MC-CDMA-сигнала военных средств радиосвязи, оптимальных за критерием максимума показателя энергетической эффективности при заданной пропускной возможности.

Ключевые слова: военные системы радиосвязи, широкополосные сигналы, псевдослучайные последовательности, MC-CDMA-сигнал.

METHOD OF CONTROL PARAMETERS MC-CDMA-SIGNAL MILITARY MEANS, DEPENDING ON THE CHANNEL STATUS

M.Yu. Yakovlev, L.L. Bortnik

The paper proposed a method for controlling the parameters of MC-CDMA-military means of radiosignals as a function of channel status, the essence of which lies in the adaptive parameter values, MC-CDMA-signal radiocommunications for military purposes, the best measure of the maximum rate of energy efficiency for a given through put capability.

Keywords: military radiosystem, broad band signals, pseudo-random sequence, MC-CDMA-signal.