

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ OFDM-СИГНАЛУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОПРОМЕНЕВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано методику вибору значень параметрів сигналу з ортогональною частотною модуляцією, оптимальних за критерієм частотної ефективності, яку доцільно застосовувати в умовах багатопроблемних каналів. Відмінність розробленої методики від відомих полягає у застосуванні методу половинного ділення при визначенні піднесучих, на яких припиняється передача корисної інформації на час, протягом якого можна вважати передатну характеристику каналу незмінною. Параметрами сигналу, значення яких вибираються при розв'язанні оптимізаційної задачі є кількість активних піднесучих та вид сигнально-кодової конструкції для кожної піднесучої, що визначається позиційністю модуляції та швидкістю завадостійкого коду.

Ключові слова: ортогональне частотне мультиплексування, сигнально-кодова конструкція, швидкість передачі інформації, ймовірність бітової помилки, частотна ефективність.

Вступ

Технологія ортогонального частотного мультиплексування з розділенням – OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) знаходить широке застосування в телекомунікаційних системах [1]. В роботі [2] запропоновано методику формування OFDM-сигналу для підвищення енергетичної ефективності передачі інформації в системах радіозв'язку спеціального призначення. Підвищення енергетичної ефективності передачі сигналу дозволяє зменшити потужність передавача, що, в першу чергу, сприяє підвищенню прихованості передачі інформації, а крім того, покращенню електромагнітної сумісності та зниженню енергоспоживання засобів зв'язку.

В той же час, не менш актуальним є завдання підвищення частотної ефективності, що забезпечує максимальну пропускну спроможність системи радіозв'язку (СРЗ) [3–5]. Технологія OFDM дозволяє максимально ефективно використовувати пропускну спроможність багатопроблемних каналів радіозв'язку [4]. Тому метою статті є розробка методики вибору параметрів OFDM-сигналу засобів радіозв'язку, оптимальних за критерієм максимуму показника частотної ефективності при заданій достовірності передачі інформації та потужності передавача.

Суть методики зводиться до вибору на піднесучих сигнально-кодових конструкцій, при яких забезпечується максимальна швидкість передачі інформації при виконанні вимог по якості, що визначається ймовірністю бітової помилки, найгірші піднесучі при цьому не використовуються для передачі інформації.

Постановка завдання

Задано: параметри передавального пристрою і каналу зв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1, n}$, де $\psi_1 \dots \psi_n$ – кількість піднесучих, потужність передавача, відношення сигнал/шум в каналі (задається для кожного підканалу окремо), робоча частота, види модуляції, мінімально необхідна швидкість передачі інформації (необхідна пропускну спроможність), смуга пропускання каналу зв'язку, набір коригувальних згорткових кодів з відповідними параметрами: швидкість коригувального коду, граничне значення відношення сигнал/шум в каналі, при якому коригувальний код починає давати вигоду порівняно з модуляцією без кодування. Початковий режим роботи, який забезпечує мінімально необхідну швидкість передачі інформації $v_{i \text{ доп}}$ передбачає використання усіх піднесучих, квадратурної фазової маніпуляції (КФМ) та коригувального коду із заданою швидкістю ($R = 0,5$).

Необхідно: визначити параметри сигналу (кількість активних піднесучих, сигнально-кодову конструкцію для кожної піднесучої (вид модуляції та коригувального коду), при яких максимізується частотна ефективність СРЗ β_F при виконанні обмежень на значення ймовірності бітової помилки приймання сигналів $P_6 \leq P_{6 \text{ доп}}$.

Обмеження: вид коригувального коду – згорточні коди зі швидкостями $R = \frac{1}{4}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{3}{4}$; вид сигналу – КФМ, КАМ-М, ($M = 16, 32, 64, 128, 256$); кількість піднесучих N ($N = 256$); максимально допустима ймовірність помилкового приймання сигналів $P_{\text{б доп}} = 10^{-6}$. В залежності від системних вимог вказані обмеження можуть змінюватись.

Допущення: стан передатної характеристики каналу зв'язку $H_{\text{заг}}$ перед передачею чергового OFDM-символу відомий та не змінюється під час передачі символу: $H_{\text{заг}} = H_1, H_2, \dots, H_N = \sum_{i=1}^N H_i$; амплітудна характеристика підсилювача потужності передавача лінійна – нелінійні спотворення сигналу відсутні.

Завдання визначення параметрів OFDM-сигналу з максимальними показниками частотної ефективності зводяться до типової оптимізаційної задачі. Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд

$$\begin{cases} \beta_F = F_1(\Delta F, T_S, M, R, N_A) = \max; \\ P_6 = F_2(P_c, G_{0i}, M_i, R_i, d_{fi}, N_A) \leq P_{\text{б доп}}; \\ P_{\text{прд}} = \text{const}, \end{cases} \quad (1)$$

де $P_{\text{прд}}$ – потужність передавача, N_A – кількість активних піднесучих (підканалів, де передається інформація), $N_A = N - N_B$, N_B – підканали, що відключаються, P_c – потужність сигналу в підканалі ($P_c = P_{\text{прд}} / N_A$), G_0 – спектральна щільність потужності шуму, M_i – розмірність ансамблю сигналів, R_i – швидкість коригувального коду ($R = k/n$), k – кількість інформаційних біт на вході кодера, n – кількість біт на виході кодера, d_{fi} – величина вільної відстані, що характеризує завадозахисні властивості згорточного коду, i – індекс підканалу, ΔF – ширина спектра сигналу. Значення $P_{\text{прд}}$, ΔF , T_S є постійними, значення G_{0i} , M_i , R_i , d_{fi} – задаються для кожного активного підканалу.

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

$$v_i = \frac{B}{T_S} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \log_2 M_i \cdot R_i}{T_S},$$

де T_S – тривалість символу, B – кількість інформаційних біт, що передається в одному OFDM-символі, i – індекс активного підканалу.

Частотна ефективність визначається як [6]:

$$\beta_F = v_i / \Delta F.$$

Завадостійкість для КФМ та КАМ-М визначається за формулами (2) та (3), відповідно [7, 8]:

$$P_{\text{б кфм}} = \left[1 - \Phi \left[\sqrt{\frac{2E_6}{G_0}} \right] \right], \quad (2)$$

де $E_6 = P_c \cdot T_S$ – енергія сигналу, $\Phi(x)$ – функція Крампа;

$$P_{\text{б кам-м}} = \frac{(1 - 1/\sqrt{M})}{\log_2 \sqrt{M}} \left[1 - \Phi \left[\sqrt{\left(\frac{3 \log_2 \sqrt{M}}{M - 1} \right) \frac{2E_6}{G_0}} \right] \right]. \quad (3)$$

При використанні згорточних кодів вводиться поняття P_k – імовірність вибору при декодуванні помилкового шляху ваги $d = k$, де k – кількість символів на вході декодера.

Значення P_k залежить від того, у якому каналі здійснюється декодування. Для дискретного каналу з жорстким рішенням на виході демодулятора імовірність P_k визначається з умови, що на довжині послідовності на вході декодера, відбудеться $(k + 1)/2$ і більш помилок [7], тобто

$$P_k = \begin{cases} \sum_{j=\frac{k+1}{2}}^k C_k^j P_{\text{пом}}^j (1 - P_{\text{пом}})^{k-j} & \text{для непарних } k; \\ \frac{1}{2} C_k^{k/2} P_{\text{пом}}^{k/2} (1 - P_{\text{пом}})^{k/2} + \sum_{j=\frac{k}{2}+1}^k C_k^j P_{\text{пом}}^j (1 - P_{\text{пом}})^{k-j} & \text{для парних } k, \end{cases} \quad (4)$$

де $C_n^j = n! / j!(n - j)!$ – біноміальний коефіцієнт, замість $P_{\text{пом}}$ підставляються формули (2) або (3).

Набір коефіцієнтів w_k для різних $k \geq d_f$ називається спектром ваг згорткового коду. Спектр ваг показує сумарну кількість помилок на виході декодера, коли замість правильного шляху по решітчастій діаграмі вибирають помилкові шляхи, які відстоять від правильного на величину $d = k$. Використовуючи правило додавання імовірностей, можна визначити імовірність помилки на біт

$$P_{\text{б}} < w_k P_k. \quad (5)$$

У каналі з м'яким рішенням на виході демодулятора при використанні КФМ імовірність P_k розраховується за формулою [7]

$$P_k = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E_{\text{б}} R}{G_0}} \right) \right]. \quad (6)$$

З аналізу системи (1) випливає, що її обчислювальна складність при розв'язанні методом повного перебору в реальному масштабі часу може виявитись неприйнятною. Однак, якщо певним чином змінити порядок розв'язання задачі та більшість розрахунків провести на етапі проектування, бажаний результат розрахунку можна отримати значно простіше.

Методика вибору параметрів OFDM-сигналу, алгоритм реалізації якої представлений на рис. 1, складається з наступних етапів.

1. Введення вихідних даних (блок 1). Вводяться параметри передавального пристрою і каналу зв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів $P_{\text{б доп}}$ та мінімально необхідної інформаційної швидкості передавання $V_{\text{і доп}}$.

2. Оцінка передатної характеристики каналу зв'язку (блок 2). На даному етапі за допомогою пілот-несучих оцінюється стан багатопроменевого каналу зв'язку та визначається його передатна характеристика. В загальному випадку оцінка стану каналу може здійснюватись як прямими, так і непрямыми методами. Докладніше вони розглянуті в [9]. Основною вимогою до процесу оцінювання каналу є максимально висока точність при мінімальних затратах пропускної спроможності каналу.

3. Впорядкування підканалів у порядку зменшення відношень сигнал/шум на вході приймача (блок 3). На даному етапі за результатами оцінки передатної характеристики каналу здійснюється присвоєння порядкових номерів кожному підканалу в порядку зменшення відношень сигнал/шум (гірші підканали мають більші порядкові номери):

$$Q_1^2 \geq Q_2^2 \geq \dots \geq Q_N^2.$$

4. Ітераційна процедура відключення підканалів (блоки 4-7, 9, 11, 13). Підканали, відношення сигнал/шум (ВСШ) у яких нижче мінімально необхідного значення $Q_{\text{доп}}^2$, яке

визначається при використанні найменш ефективної (за критерієм частотної ефективності) СКК – квадратурної фазової маніпуляції зі швидкістю кодування $R = 1/4$ та забезпеченні $P_{\text{доп}}$, підлягають відключенню. Відомо, що такий прийом при формуванні OFDM-сигналу дозволяє підвищити ефективність (енергетичну або частотну) передачі інформації [10]. Тоді потужність передавача рівномірно розподіляється між іншими невідключеними (активними) підканалами.

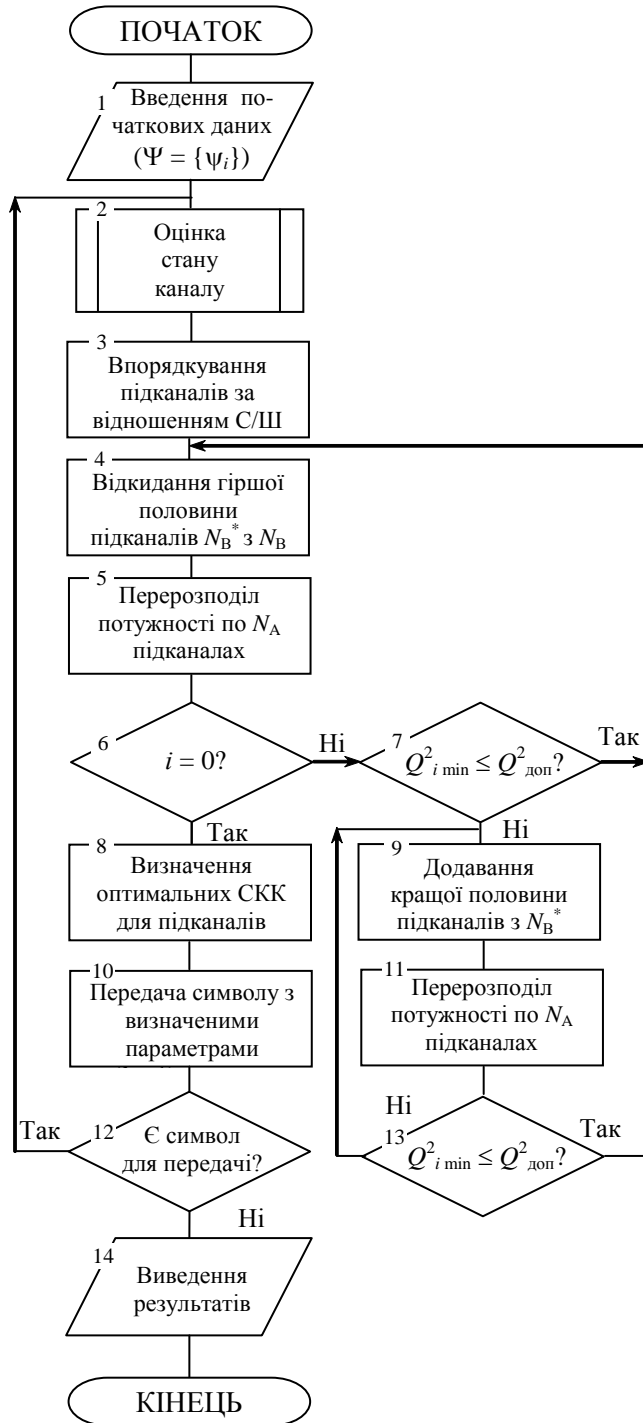


Рис. 1. Алгоритм вибору параметрів радіотракту в залежності від стану каналу зв'язку

Оскільки за рахунок перерозподілу потужності за рахунок відключених підканалів ВСШ в активних підканалах збільшується, то, можна припустити, що доцільно відключати не всі підканали, для яких $Q_i^2 \leq Q_{\text{доп}}^2$, а тільки їх частину.

Тому для оптимального використання частотного ресурсу каналу можна запропонувати декілька алгоритмів.

Алгоритм 1. Після сортування підканалів за значеннями ВСШ відключати почергово починаючи з найгіршого. Потужність у активних підканалах при цьому буде зростати. У цьому випадку, ітераційна процедура зупиниться, коли відключати буде уже нічого – вимоги по допустимій ймовірності помилки на усіх піднесучих будуть виконуватись. Проте, такий алгоритм може потребувати значного часу для розрахунків.

Алгоритм 2. Після визначення непридатних спочатку підканалів їх відключення доцільно провести методом "половинного ділення". Якщо краща половина невідкинутих підканалів ($N_B - N_B^*$, де N_B – підканали, що спочатку відібрані для відключення, N_B^* – їх гірша за критерієм ВСШ половина) уже задовольняє вимогам до якості передачі після перерозподілу потужності (блоки 4, 5), далі повертається половина із відкинутих на попередньому кроці (блок 9). Якщо ж ні – відкидається гірша половина із кращої (блок 4). Ця ітераційна процедура триває доти, поки невідключених підканалів, що не задовольняють мінімально необхідному значенню ВСШ не залишиться (виконується умова блоку 6).

Обидва алгоритми повинні привести до одного й того ж результату, проте очевидно, що другий у більшості випадків забезпечить вибір оптимальних значень параметрів багаточастотного сигналу за меншу кількість кроків для більшості випадків, тому він є більш універсальним і використовується у запропонованій методиці.

5. Вибір оптимальних сигнально-кодових конструкцій (блок 8). На даному етапі зі скінченої кількості коригувальних кодів та видів модуляції, що визначаються вихідними даними, в залежності від поточного ВСШ, для кожного підканалу визначається СКК, яка дозволяє отримати максимальне значення швидкості передачі при забезпеченні заданої ймовірності бітової помилки (за формулами (2)-(6)). Необхідні розрахунки проводяться на етапі проектування, тому практично не потребують витрат часу на етапі ведення зв'язку. Пристрій управління вибором параметрів сигналу повинен лише вибрати з множини можливих СКК оптимальну для даного стану каналу.

6. Передача чергового символу (блок 10). В результаті визначаються параметри чергового OFDM-символу: кількість активних підканалів N_A та їх номери, M та R для кожного підканалу, інформація про значення яких передається у складі службової інформації для зустрічної станції.

Очевидно, що запропонована ітераційна процедура полягає у відключенні піднесучих з малими коефіцієнтами підсилення (великими потужностями ефективного шуму) та виборі СКК на кожній піднесучій, що забезпечує найбільшу пропускну спроможність при заданій ймовірності помилкового приймання: $P_6 \leq P_{6\text{доп}}$.

Задача визначення необхідної кількості піднесучих для відключення розв'язується методом половинного ділення і продовжується до тих пір, поки не лишається жодної піднесучої для відключення.

Висновки

Таким чином, в роботі запропоновано методику вибору параметрів OFDM-сигналу, призначену для підвищення частотної ефективності систем радіозв'язку. Відмінність розробленої методики від відомих полягає у застосуванні методу половинного ділення при визначенні піднесучих, на яких припиняється передача корисної інформації на час, протягом

якого можна вважати передаточну характеристику каналу незмінною. Параметрами сигналу, значення яких вибираються при розв'язанні оптимізаційної задачі є: кількість активних піднесучих та вид сигнально-кодової конструкції для кожної піднесучої, що визначається позиційністю модуляції та швидкістю завадостійкого коду. Оптимальні параметри OFDM-сигналу для конкретного стану каналу зв'язку визначаються зі скінченної кількості допустимих варіантів, що дозволяє спростити практичну реалізацію модемного обладнання адаптивних систем радіозв'язку.

Виходячи з оцінки ефективності методики вибору значень параметрів багаточастотного сигналу для максимізації енергетичної ефективності [2], що склала близько 2-3 дБ в залежності від глибини завмирань у багатопробеному каналі, можна стверджувати, що на основі границі Шеннона [6], частотна ефективність при використанні запропонованої методики та відповідних СКК повинна зрости на величину приблизно 1-2 дБ. Про це свідчать і дослідження проведені у [11] для блочних кодів та багатопозиційних видів фазової та квадратурної амплітудної маніпуляції.

Напрямок подальших досліджень є розробка імітаційної моделі та точна оцінка ефективності запропонованої методики.

Література

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / [Вишневикий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В.]. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Гурський Т. Г. Методика вибору параметрів OFDM-сигналу військових засобів радіозв'язку в залежності від стану каналу передачі / Т. Г. Гурський // Збірник наукових праць ВІКНУ. – 2009. – Вип. 17. – С.107–115.
3. Оптимизация параметров группового сигнала систем передачи с ортогональными гармоническими сигналами / [Балашов В.А., Ефремов В.П., Ляховецкий Л.М., Кравченко С.Ю.] // Зв'язок. – 2002. – № 4. – С. 19 – 24.
4. Leke A. A maximum rate loading algorithm for discrete multitone modulation systems / Leke A., Cioffi J.M. // Proc. of IEEE GLOBECOM'97, V. 3. – 1997. – P. 1514 – 1518.
5. J. Jang. Transmit power and bit allocations for OFDM systems in a fading channel / J. Jang, K. Bok Lee, Y. Lee // Proc. of IEEE GLOBECOM'03. – 2003. – P. 858 – 862.
6. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / Под редакцией А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
7. Теорія електрозв'язку. Підручник / О.В. Корнейко, О.В. Кувшинов, О.П. Лежнюк, С.П. Лівенцев / Під ред. С.П. Лівенцева. – К.: НВФ „Славутич-Дельфін”, 2006. – Т. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та розподілу інформації. – 292 с.
8. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом „Вильямс”, 2004. – 1104 с.
9. Аналіз методів оцінювання параметрів багатопробенових каналів зв'язку / [Кувшинов О.В., Толупа С.В., Гурський Т.Г., Восколович О.І.] // Вісник ДУІКТ. – 2011. – Т. 9 (3). – С. 194–204.
10. Мальцев А.А. Исследование характеристик OFDM-систем радиосвязи с адаптивным отключением поднесущих / Мальцев А.А., Рубцов А.Е. // Вестник ННГУ. Серия Радиофизика. – 2007. – № 5. – С. 43 – 49.
11. Гурський Т. Г. Компенсація впливу навмисних завад та частотно-селективних завмирань в OFDM-системі радіозв'язку / Т. Г. Гурський, Л. С. Різник, О. В. Гуменюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – Вип. 3. – С. 38–46.