*УДК 621.396.2*
**© С. Толюпа[1], 2012**

# ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ OFDM-СИГНАЛУ ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СТАНУ КАНАЛУ

***Дана робота присвячена питанню підвищення енергетичної ефективності радіозасобів з використанням модуляції ортогональними гармонійними несучими в умовах впливу навмисних завад та частотно-селективних завмирань при забезпеченні заданого рівня достовірності та швидкості передачі інформації.***

***This article is sanctified to the question of increase of power efficiency of radiofacilities with the use of modulation ortogonal harmonious bearing in the conditions of influence of intentional hindrances and frequency-selective stopping beating at providing of the set level of authenticity and speed of information transfer.***

## 1. ВСТУП

Важливим показником ефективності систем радіозв'язку (СРЗ) є енергетична ефективність, яка є тим більшою, чим менше енергії необхідно для передачі одного біта інформації. Переваги підвищення енергетичної ефективності очевидні: мінімізація потужності випромінювання передавача, покращення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, підвищення прихованості передачі інформації, мінімізація енергоспоживання [1].

Сутність запропонованої методики полягає у адаптивному виборі значень параметрів OFDM-сигналу засобів радіозв'язку призначення, оптимальних за критерієм максимуму показника енергетичної ефективності при заданій достовірності передачі інформації та пропускній спроможності.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

*Задано:* параметри передавального пристрою і каналу зв'язку $\Psi = \{\psi_i\}$, $\boldsymbol{i} = \overline{1,\ 10}$, де $\psi_1 \ldots \psi_{10}$ – кількість піднесучих, потужність корисного сигналу, відношення сигнал/шум в каналі, робоча частота, вид модуляції, швидкість передачі інформації (необхідна пропускна спроможність), смуга пропускання каналу зв'язку, набір коригувальних кодів з відповідними параметрами: довжина кодової комбінації, швид-

[1] Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

кість коригувального коду, величина кодової відстані, граничне значення відношення сигнал/шум в каналі, при якому коригувальний код починає давати виграш порівняно з модуляцією без кодування. Початковий режим роботи, який забезпечує необхідну швидкість передачі інформації $\boldsymbol{v}_{\text{і доп}}$ передбачає використання усіх піднесучих та найменш швидкісного коригувального коду.

*Необхідно:* визначити оптимальні значення параметрів сигналу (кількість активних піднесучих та їх номери, коригувальний код, потужність передавача та її розподіл між підканалами), при яких максимізується енергетична ефективність СРЗ $\beta_E$ при виконанні обмежень на значення ймовірності помилкового приймання сигналів $\boldsymbol{P}_{\text{б}} \le \boldsymbol{P}_{\text{б доп}}$ та швидкість передавання в каналі $\boldsymbol{v}_{\text{і}} \ge \boldsymbol{v}_{\text{і доп}}$.

*Обмеження*: вид коригувального коду – згорточні коди зі швидкістю $R = 0{,}5\text{-}0{,}9$; вид сигналу – ФМ-4; кількість піднесучих $N = 256$; максимально допустима ймовірність помилкового приймання сигналів $\boldsymbol{P}_{\text{б доп}} = 10^{-5}$.

*Допущення:* стан передаточної характеристики каналу зв'язку $H_{\text{заг}}$ перед передачею чергового OFDM-символу відомий та не змінюється під час передачі символу: $\boldsymbol{H}_{\text{заг}} = \boldsymbol{H}_1, \boldsymbol{H}_2, \ldots, \boldsymbol{H}_N = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{H}_i$, де $H_i$ – передаточна характеристика $i$-го підканалу; амплітудна характеристика підсилювача потужності передавача лінійна – нелінійні спотворення сигналу відсутні.

## 3. ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ OFDM-СИГНАЛУ

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

$$\begin{cases} \boldsymbol{\beta}_E = \boldsymbol{F}_1(\boldsymbol{v}_{\text{і}}, \Delta\boldsymbol{F}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{n}, \boldsymbol{R}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{P}_{\text{с}}, \boldsymbol{N}_{\text{А}}) \to \max; \\ \boldsymbol{P}_{\text{б}} = \boldsymbol{F}_2(\boldsymbol{P}_{\text{с}}, \boldsymbol{M}, \boldsymbol{n}, \boldsymbol{R}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{N}_{\text{А}}) \le \boldsymbol{P}_{\text{б доп}}; \\ \boldsymbol{v}_{\text{і}} = \boldsymbol{F}_3(\boldsymbol{M}, \boldsymbol{R}, \boldsymbol{N}_{\text{А}}) \ge \boldsymbol{v}_{\text{і доп}}, \end{cases} \tag{1}$$

де $n$ – довжина кодової комбінації, $P_{\text{с}}$ – потужність сигналу, $M$ – розмірність ансамблю сигналів, $R$ – швидкість коригувального коду ($\boldsymbol{R} = \boldsymbol{k} / \boldsymbol{n}$), $k$ – кількість інформаційних біт в кодовій комбінації дов-

жиною $n$, $d$ – величина кодової відстані, $N_A$ – кількість активних піднесучих, $\Delta F$ – ширина спектра сигналу.

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

$$\boldsymbol{v}_{\text{і}} = \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{T_S}} = \frac{\boldsymbol{N} \cdot \log_2 \boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{R}}{\boldsymbol{T_S}},$$

де $T_S$ – тривалість символу; $B$ – кількість інформаційних біт, що передається в одному OFDM-символі. У разі застосування адаптивного розподілу потужності (АРП) відношення сигнал/шум на вході приймача у всіх підканалах вирівняються та приймуть значення $\boldsymbol{Q}^2_{\text{ср}}$. Виразимо значення усередненого між усіма підканалами відношення сигнал/шум:

$$\boldsymbol{Q}^2_{\text{ср}} = \boldsymbol{P}_{\text{с}} \cdot \frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{n}} / \sum_{\boldsymbol{i}=1}^{\boldsymbol{N}_{\text{A}}} \boldsymbol{G}_{0\boldsymbol{i}}, \tag{2}$$

де $G_{0i}$ – спектральна щільність потужності шуму в $i$-му підканалі.

Енергетична ефективність визначається [2], як

$$\boldsymbol{\beta_E} = \boldsymbol{v}_{\text{і}} \big/ \boldsymbol{Q}^2_{\boldsymbol{cp}}.$$

Ймовірність помилки в формулі при застосуванні коригувального коду визначається виразом

$$\boldsymbol{P}_{\text{пом кк}} \geq \sum_{\boldsymbol{j}=\boldsymbol{s}_{\text{випр}}+1}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{C}^{\boldsymbol{j}}_{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{P}^{\boldsymbol{j}}_{\text{пом}} (1 - \boldsymbol{P}_{\text{пом}})^{\boldsymbol{n}-\boldsymbol{j}}, \tag{3}$$

де $\boldsymbol{P}_{\text{пом кк}}$ – ймовірність помилкового декодування кодової комбінації, $\boldsymbol{s}_{\text{випр}} = (\boldsymbol{d}-1)/2$ – кратність помилок, яку код виправляє, $j$ – кратність помилки у блоці з $n$ елементів, $\boldsymbol{P}_{\text{пом}}$ – ймовірність виникнення помилок в послідовності переданих кодових елементів, $\boldsymbol{C}^{\boldsymbol{j}}_{\boldsymbol{n}} = \boldsymbol{n}! / \boldsymbol{j}!(\boldsymbol{n}-\boldsymbol{j})!$ – біноміальний коефіцієнт, який дорівнює кількості різних сполучень $j$ помилок у блоці з $n$ символів. Значення $\boldsymbol{P}_{\text{пом}}$ визначається видом модуляції сигналу та розраховується з урахуванням швидкості кодування $R$:

$$\boldsymbol{P}_{\text{пом}} = \left[1 - \Phi\left[\sqrt{2\boldsymbol{Q}^2_{\text{ср}}\boldsymbol{R}}\right]\right], \tag{4}$$

де Ф – функція Крампа [2].

Тоді з урахуванням формул (3) та (4)

$$\boldsymbol{P}_{\text{б}} = \sum_{\boldsymbol{j}=(\boldsymbol{d}+1)/2}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{C}^{\boldsymbol{j}}_{\boldsymbol{n}} \cdot \left[1 - \Phi\sqrt{2\boldsymbol{Q}^2_{\text{ср}}}\right]^{\boldsymbol{j}} \cdot \left[1 - \left(1 - \Phi\sqrt{2\boldsymbol{Q}^2_{\text{ср}}}\right)\right]^{\boldsymbol{n}-\boldsymbol{j}}. \tag{5}$$

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 $P_с$ знаходяться значення параметрів, які забезпечують мінімальну ймовірність помилки $P_б$. Оскільки значення $\Delta F$, $M$, $T_S$ згідно вихідних даних є постійними можна замінити на $B$. Таким чином, система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі перетворюється до вигляду:

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{\text{пом}} = \sum\limits_{j=(d+1)/2}^{n} \boldsymbol{C}_n^j \cdot \left[1-\Phi\sqrt{2\boldsymbol{Q}_{\text{ср}}^2}\right]^j \cdot \left[1-\left(1-\Phi\sqrt{2\boldsymbol{Q}_{\text{ср}}^2}\right)\right]^{n-j} \to \min; \\ \boldsymbol{B} = \boldsymbol{N}_{\text{А}} \cdot \boldsymbol{R} \geq \boldsymbol{B}_{\text{доп}}, \\ \boldsymbol{Q}_{\text{ср}}^2 \geq \boldsymbol{Q}_{\text{гр}}^2, \\ \boldsymbol{P}_{\text{с}} = \text{const}. \end{cases} \qquad (6)$$

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

Після цього, потрібно знайти значення $\boldsymbol{P}_{\text{с}}$, при якому $\boldsymbol{P}_{\text{б}} = \boldsymbol{P}_{\text{б доп}}$. В явному вигляді розв'язати рівняння (5) відносно змінної $\boldsymbol{P}_{\text{с}}$ неможливо. Тому, для розв'язання (5) доцільно застосувати метод половинного ділення.

Запропонована ітераційна процедура полягає в поступовому відключенні піднесучих з малими коефіцієнтами підсилення (великими потужностями ефективного шуму), адаптивному розподілі потужності між активними піднесучими з метою вирівнювання передаточної характеристики каналу та виборі коригувального коду, що забезпечує найменшу ймовірність помилкового приймання. Після цього запас по завадостійкості обмінюється на зменшення загальної потужності випромінювання передавача (тобто потужність зменшується до тих пір, поки ймовірність помилки не стане рівною допустимому значенню $\boldsymbol{P}_{\text{б}} \leq \boldsymbol{P}_{\text{б доп}}$.

Для проведення оцінки ефективності запропонованої методики з використанням рекомендацій [3], було розроблено імітаційну модель в середовищі програмування *MathCad*.

Програма, що реалізує розроблену модель, імітує роботу радіолінії для наступних випадків:

1) без застосування адаптації в радіотракті (система 1);

2) із застосуванням адаптації за потужністю випромінювання, тобто алгоритму АРП (система 2).

3) із застосуванням розробленої методики вибору оптимальних значень параметрів OFDM-сигналу в залежності від стану каналу зв'язку (система 3).

Системи 1 та 2 працюють з використанням найменш швидкісного коду із заданого набору ($R$ = 0,5) і не застосовують алгоритму відключення піднесучих. Можна вважати, що система 1 відтворює алгоритм роботи згідно стандарту IEEE 802.11a, що використовує модуляцію OFDM. Однак, слід зазначити, що оцінка ефективності в порівнянні з даною системою досить умовна, оскільки у випадку погіршення якості зв'язку до недопустимого рівня система IEEE 802.11a переходить на іншу робочу частоту.

Оцінка ефективності розробленої методики проводилась шляхом порівняння показників енергетичної ефективності для систем 1, 2 та 3 при заданих однакових вихідних даних. На рис. 1 представлено залежність приросту потужності передавача $\Delta P_c$ для даних трьох систем від середнього відношення сигнал/шум в каналі при заданій глибині частотно-селективних завмирань.

Лінія абсцис відповідає використанню максимально можливої потужності передавача, тобто додатні значення по осі $y$ в принципі реалізувати неможливо (при таких умовах система не може з заданою якістю забезпечувати обмін інформацією), а розрахунки для цієї області проводились для порівняння ефективності систем 1 – 3 між собою. З графіків видно, що система 3 дозволяє збільшити показник енергетичної ефективності в залежності від глибини селективних завмирань на величину 5-7,5 дБ у порівнянні з системою 1 та на величину 2-3 дБ у порівнянні з системою 2.

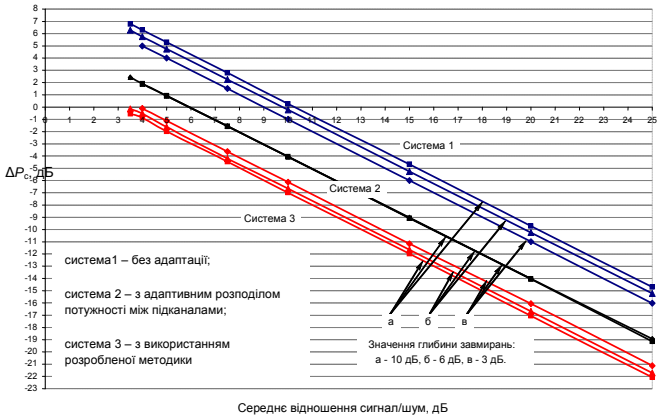


*Рис. 1. Залежність приросту потужності передавача від середнього відношення сигнал/шум в каналі для різних значень глибини завмирань*

На рис. 2 представлено залежність приросту потужності передавача від ширини смуги навмисної завади для каналу з середнім відношенням сигнал/шум 10 дБ та з глибиною завмирань 6 дБ.

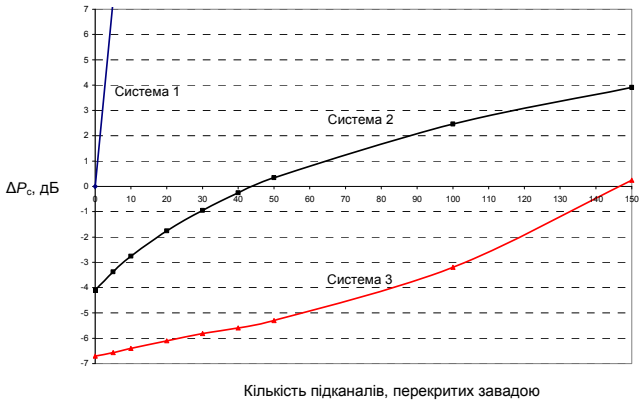


*Рис. 2. Залежність приросту потужності передавача від ширини смуги навмисної завади для каналу з середнім відношенням сигнал/шум 10 дБ та з глибиною завмирань 6 дБ*

Потужність завади вибирається такою, що створює відношення сигнал/шум 0 дБ в підканалі системи 1. Видно, що система 3 в таких умовах здатна забезпечувати передачу інформації при ширині смуги потужної завади, що перекриває близько 50% спектра сигналу. Для системи 2 постановнику завад достатньо перекрити менше 20% спектра сигналу, щоб вивести її з ладу, а система 1 перестає функціонувати з заданою якістю при перекритті завадою хоча б однієї піднесучої.

Оцінка обчислювальної складності реалізації розробленої методики показала, що для заданих вихідних даних та при використанні процесора ADSP-21261 формування сигналу з оптимальними значеннями параметрів може здійснюватися в реальному масштабі часу з урахуванням затримки, необхідної для передачі інформації про ці значення по службовому каналу зворотного зв’язку.

## 4. ВИСНОВОК

Оптимальні значення параметрів сигналу для конкретного стану каналу зв’язку визначаються зі скінченної кількості допустимих варіантів, що дозволяє спростити практичну реалізацію модемного обладнання адаптивних систем радіозв’язку. Відмінність запропонованої методики полягає в тому, що оптимальні значення параметрів OFDM-сигналу визначаються за критерієм максимуму показника енергетичної ефективності в умовах частотно-селективних завмирань та впливу на-

вмисних завад, а параметрами сигналу, значення яких визначаються при розв'язанні оптимізаційної задачі є: кількість активних піднесучих, вид коригувального коду, потужність передавача та коефіцієнти підсилення частотних підканалів.

Позитивний ефект від впровадження розробленої методики забезпечують наступні взаємопов'язані фактори: максимізація енергетичної ефективності; мінімізація потужності передавача; покращення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів; підвищення прихованості передачі інформації; мінімізація енергоспоживання. Одержані результати можуть бути застосовані в адаптивних системах радіозв'язку, що дозволить істотно підвищити показники енергетичної ефективності системи.

*1. Григорьев В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с. 2. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / [А. Г. Зюко , А. И. Фалько, И. П. Панфилов и др.]; под ред. А. Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с. 3. Иващенко А. В. Основы моделирования сложных систем на ЭВМ / А. В. Иващенко, Р. П. Сыпченко. – Л.: ЛВВИУС, 1988. – 272 с.*