

Макаренко А.О. Державний університет телекомунікацій, Київ

## МЕТОД ЗНИЖЕННЯ КІЛЬКОСТІ ОПЕРАЦІЙ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ OFDM-СИСТЕМ 5 ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ПІК-ФАКТОРА І ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНИХ ПРОМИСЛОВИХ ЗАВАД

Запропонований метод зниження обчислювальної складності цифрової обробки сигналів програмно-конфігурованих OFDM-систем 5 покоління. Проведено дослідження впливу OFDM-системи з ортонормованим розрідженим перетворенням (ОПІ) на значення відношення сигнал/шум з використанням каналу з частотно-вибірковими замираннями. Моделювання проводилось з використанням системи блокового імітаційного візуального математичного моделювання VisSim. Відношення сигнал/шум OFDM-системи складає близько 17 дБ при значенні коефіцієнта бітових помилок  $10^{-4}$ .

**Ключові слова:** 5G, програмно-конфігурована OFDM-система, ортонормоване розріджене перетворення, обчислювальна складність, відношення сигнал/шум.

Makarenko A. O. State University of Telecommunications, Kyiv

## METHODS TO REDUCE THE NUMBER OF OPERATIONS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING PROGRAM-CONFIGURED OFDM-SYSTEMS 5 GENERATION FOR REDUCING PEAK FACTOR AND PULSE INDUSTRIAL NOISE EXPOSURE

In the article in connection with the adoption of the international standard 5G, which for several years has been developed jointly by the largest telecommunication and IT corporations in the world, the technical requirements for 5G networks compared with the characteristics of existing LTE networks. It is shown that in order to meet the key requirements for 5G networks, new technological solutions for the radio access network, the basic network, the transport network, subscriber devices, as well as the development of various related technologies are needed. It is determined that OFDM technology, for effective use in 5G networks, requires fundamental changes. However, these changes can be achieved by further increasing the computational complexity. The article presents a method for reducing the computational complexity of the digital processing of signals of software-configurable OFDM systems of the 5th generation, which also effectively allows to deal with the disadvantages of power amplifiers (decrease of the peak factor) and the pulse industrial noise exposure. In the calculation of the efficiency of the IOST and OST, the performance characteristics are in the range of 11 to 24%. The influence of the OFDM-system with orthonormal sparse transformation on the signal-to-noise ratio using a channel with frequency-selective fading was conducted. Simulation simulations were performed using VisSim's universal system of block simulation visual mathematical modeling. The effectiveness of the OFDM system with OST compared to the usual OFDM with QPSK modulation, even at low signal-to-noise ratio, is about 17 dB, measured at  $10^{-4}$  BER.

**Keywords:** 5G, software-configurable OFDM system, computational complexity, signal-to-noise ratio.

Макаренко А. А. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

## МЕТОД СНИЖЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОПЕРАЦИЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ OFDM-СИСТЕМ 5 ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА И ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕХ

Предложен метод снижения вычислительной сложности цифровой обработки сигналов программно-конфигурируемых OFDM-систем 5 поколения. Проведено исследование влияния OFDM-системы с ортонормированным разреженным преобразованием (ОПІ) на значение отношения сигнал/шум с использованием канала с частотно-избирательными замираньями. Моделирование

проводилось с использованием системы блочного имитационного визуального математического моделирования VisSim. Отношение сигнал/шум OFDM-системы составляет около 17 дБ при значении коэффициента битовых ошибок  $10^{-4}$ .

**Ключевые слова:** 5G, программно-конфигурированная OFDM-система, ортонормированное разреженное преобразование, вычислительная сложность, отношение сигнал/шум.

## Вступ

В зв'язку з прийняттям міжнародного стандарту 5G, який кілька років розроблявся спільно найбільшими телекомунікаційними та ІТ-корпораціями світу, орієнтиром розвитку нових технологічних рішень для мереж мобільного зв'язку є вимоги до майбутніх мереж 5G, які сформовані на основі прогнозу збільшення трафіку і посилення вимог до якості перспективних послуг [1, 2].

Технічні вимоги до мереж 5G порівняно з характеристиками існуючих мереж LTE-Advanced включають наступні показники [3]:

- пікова швидкість передачі даних (максимальна досяжна швидкість передачі даних на одного користувача/пристрою) – 20 Гбіт/с;
- практична швидкість передачі даних для користувача (швидкість передачі даних, яка всюди, по усій зоні покриття доступна мобільному користувачеві/ пристрою) – 100 Мбіт/с;
- ефективність використання спектру (середня пропускна спроможність даних на одиницю ресурсу спектру і на один стільник, біт/с/Гц) – в три рази вище, ніж у мереж LTE-Advanced;
- мобільність (максимальна швидкість пересування мобільного користувача/пристрою, при якій забезпечується задана якість обслуговування) – 500 км/год;
- затримка (інтервал часу від моменту посилки пакету даних джерелом через радіомережу до моменту його прийому одержувачем) – 1 мс;
- щільність підключень (загальна кількість підключених або доступних пристроїв на одиницю площі) – 1 млн. на км<sup>2</sup>;
- енергоефективність (енергоефективність мережі визначається кількістю інформаційних бітів, що передаються користувачам/отримуваних від користувачів, на одиницю споживання енергії в мережі радіодоступу, енергоефективність абонентського пристрою визначається кількістю інформаційних бітів на одиницю споживання енергії модулем зв'язку) – в 100 разів вище, ніж у мереж LTE-Advanced;
- щільність трафіку (швидкість передачі даних, доступна на одиницю географічної площі) – 10 Мбіт/с на м<sup>2</sup>.

Для забезпечення ключових вимог до мереж 5G потрібні нові технологічні рішення для мережі радіодоступу, базової мережі, транспортної мережі, абонентських пристроїв, а також розвиток різних супутніх технологій.

Виходячи з цього синтез методу зниження кількості операцій цифрової обробки сигналів для програмно-конфігурованих OFDM-систем 5 покоління, є актуальною задачею і дозволить, таким чином використовувати обчислювальні потужності цифрового сигнального процесора, що звільнилися, для вищеперелічених потреб.

Незважаючи на привабливі особливості системи OFDM, слід зазначити, що загальний спектр сигналу OFDM затухає вибірково; отже, деякі субканали будуть сильно ослаблені глибокими завмираннями. У таких випадках OFDM не пропонує поліпшення ефективності, так як ніяка різноманітність застосування методів не може бути використана для відновлення ослаблених субканалів [4-9]. Тому шкідливим ефектам, які є результатом багатопроменевого поширення і впливають на ефективність OFDM-систем, присвячено значну кількість робіт вчених: Л.Н. Беркман, М.М. Климаша, О.В. Лемешка, В.М. Вишневського, А.І. Ляхова, G.R. Niertz, S.C. Bruell, L. Kleinrock, H. Takagi, L. Fratta та ін. Досліджено багато методів підвищення завадостійкості OFDM-систем від негативних наслідків розповсюдження багатопроменевих каналів, таких як кодування каналів, адаптивні системи та збільшення схематехнічної різноманітності; хоча із збільшенням обчислювальної складності та втрат швидкості передачі даних [4-13].

В статті запропоновано метод зниження кількості операцій цифрової обробки сигналів програмно-конфігурованих OFDM-систем 5 покоління, який також ефективно дозволяє боротися з недоліками роботи підсилювачів потужності (зниження рівня пік-фактора) і впливом імпульсних промислових завод.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Запропонована OFDM-система на основі використання ортонормованого розрідженого перетворення (ОРП) дозволяє збільшити частотну різноманітність і описує потенційний шлях покращення ефективності OFDM при багатопробному поширенні. Система попереднього кодування OFDM отримала значний рівень розповсюдження через підвищення ефективності таких систем при багатопробному поширенні [5]. Крім того, поширення субканалів, що використовують систему OFDM, є більш зручним підходом до використання потенціалу розповсюдження широкосмугового каналу, ніж використання адаптивної системи. OFDM має меншу складність, кращу ефективність пропускну здатності та кращу швидкість передачі даних у порівнянні з адаптивною системою. Переваги OFDM-систем зменшують вплив селективного завмирання каналу на ефективність системи як показано в [5-8]. Проте, це поліпшення може бути досягнуто за рахунок подальшого збільшення обчислювальної складності. Тому, технологія OFDM може бути ефективно використана, щоб забезпечити повну ефективність без спектральних втрат, використовуючи вдосконалені методи на основі дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Приведемо ефективні властивості ДПФ [14].

1. *Комплексна цілісність перетворення.* ДПФ і обернене ДПФ (ОДПФ) використовуються для лінійного перетворення даних від однієї області до іншої. Іншими словами, ці перетворення мають зворотні властивості – дискретні субканали часової області  $z$  розміру  $N$  дискретних субканалів частотної області  $Z$  можуть бути обчислені як

$$z = F^H Z \quad (1)$$

де  $(\cdot)^H$  – самоспряжений оператор;  $F$  означає матрицю ДПФ, тобто  $F^H$  означає матрицю ЗДПФ,  $k$  і  $n$  – індекс даних у частотній і часовій області.

Виходячи з цього,  $n$ -й елемент  $z$  визначається як

$$z_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Z_k e^{j2\pi nk/N}, \quad (2)$$

де  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  – коефіцієнт нормалізації.

Виходячи з вище представлених виразів (1) і (2) елементи  $Z$  можуть бути виражені як

$$Z_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-j2\pi nk/N}. \quad (3)$$

2. *Пік-фактор підсилювачів потужності.* Середня потужність вибірок субканалів в часовій області і в частотній області при використанні нормалізованих перетворень Фур'є ідентичні. Це означає, що із врахуванням (3)

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |z(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Z(k)|^2. \quad (4)$$

Вираз (4) представляє собою ключовий момент, який вимагає детального дослідження, щоб уникнути негативних наслідків пов'язаних з недоліками методів що регулюють пік-фактор при роботі підсилювачів потужності, в системах OFDM, що буде показано нижче.

3. *Періодичність.* Рядки і стовпці матриці ДПФ,  $F$  можуть бути перераховані на основі  $wnk = w\langle nk \rangle N$ , де  $\langle \cdot \rangle N$  є операцією по модулю  $N$ . Так само, але із зворотним знаком, елементи першої половини і другої половини матриці  $F$  дозволяють нам виразити відношення між цими елементами, як  $wnk = -w(nk - N/2)$ , для  $N/2 < nk < N$ .

4. *Теорема кругової згортки.* На основі теореми кругової згортки, згортка двох послідовностей  $z1$  і  $z2$  в часовій області може бути отримана, за допомогою оцінювання їх добутку в частотній області  $Z1$  і  $Z2$ . Це означає:

$$F^{-1}|Z1Z2| \equiv |z1 \odot z2|, \quad (5) \quad \text{чи} \quad |Z1Z2| \equiv F|z1 \odot z2|, \quad (6)$$

де символ  $\odot$  означає операцію кругової згортки.

Ця теорема використовується спільно з системою OFDM для виконання простого процесу вирівнювання каналів на основі виразів (5) і (6).

У зв'язку з розвитком обчислювальної техніки особливе значення набуло використання кусочно-постійних функцій (КПФ). При гармонійних (синусоїдальних, косинусоїдальних) діях коливання зберігають свою форму при проходженні їх через будь-яку лінійну систему. Вихідні коливання можуть відрізнятися при цьому від вхідних тільки по амплітуді і по фазі. Є класи функцій, для яких найбільш доцільне застосування розглянутих вище ДПФ [15].

Проте ДПФ властивий недолік, якого позбавлені кусочно-постійні функції. Цей недолік полягає в наступному. У області телекомунікаційних систем, а також і в області обробки зображень часто буває важливим зведення до мінімуму кількості операцій з плаваючою комою в секунду. Відносно перетворень Фур'є стало досягненням створення ШПФ, що дозволило істотно прискорити обробку інформації. Але і при цьому зберігається необхідність у виконанні великої кількості множень, що займають велику частину часу при обробці даних цифровими сигнальними процесорами. Операції множення проводяться раз за разом при розкладанні функцій в ряд Фур'є і при виконанні ШПФ.

Приведемо опис структури використання КПФ для зниження кількості операцій цифрової обробки сигналів для програмно-конфігурованих OFDM-систем в матричній формі.

Як встановлено в теоремі [15], КПФ добутку двох послідовностей еквівалентна двійковій згортці їх КПФ. Це означає:

$$K[Z1.Z2] = KZ1 \bar{\otimes} KZ2, \quad (7)$$

де  $Z1$  і  $Z2$  – будь-які два вектори дискретних даних в частотній області; символ  $\bar{\otimes}$  означає двійкову згортку.

Ця теорема буде використана для синтезу схеми OFDM-приймача методу зниження кількості операцій цифрової обробки сигналів для програмно-конфігурованих OFDM-систем.

Крім того, елементи КПФ можуть бути обчислені як

$$K_N^{km} = \frac{1}{\sqrt{N}} (-1)^{\sum_{\hat{r}=0}^{\log_2 N - 1} k_{\hat{r}} \hat{m}_{\hat{r}}}, \quad (8)$$

де  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  – нормований множник;

$k_{\hat{r}}$  і  $\hat{m}_{\hat{r}}$  є бітовими представленнями цілих значень  $k$  і  $m$ .

Нормалізація використовується для побудови ідентичних матриць як в зворотному, так і в прямому перетворенні КПФ. Тому матрична форма КПФ буде розглянута детальніше нижче.

Нормалізована  $N \times N$  зворотна матриця КПФ може бути побудована з використанням матриць нижнього порядку як:

$$K_N = \overbrace{K_2 \otimes K_2 \otimes \dots \otimes K_2}^J, \quad (9)$$

де  $N = 2^J$ ;  $J$  – ціле число;  $\otimes$  означає бінарну операцію над матрицями довільного розміру; матриця  $K_2$  визначає 2-точкові матриці КПФ, які можуть бути записані як

$$K_2 = \begin{bmatrix} K_{\frac{N}{2}} & K_{\frac{N}{2}} \\ K_{\frac{N}{2}} & -K_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Далі, як у разі будь-якого ортогонального перетворення, такого як наприклад ДПФ, матриця КПФ може бути написана як функція матриць більш нижчого порядку:

$$K_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} K_{\frac{N}{2}} & K_{\frac{N}{2}} \\ K_{\frac{N}{2}} & -K_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для забезпечення ключових вимог до мереж 5G потрібні нові технологічні рішення для мережі радіодоступу, базової мережі, транспортної мережі, абонентських пристроїв, а також розвиток різних супутніх технологій.

Виходячи з цього синтез методу зниження кількості операцій цифрової обробки сигналів для програмно-конфігурованих OFDM-систем 5 покоління, є актуальною.

Приведемо опис структури ОРП з точки зору зниження кількості операцій в матричній формі. Символьне представлення структури ОРП виходячи з (3), (7) і (8) має вигляд:

$$E_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} z_n e^{-j2\pi nk/N} \times K_N^{kn}, \quad (12)$$

Приведемо опис структури ОРП з точки зору зниження кількості операцій цифрової обробки сигналів в матричній формі.

Виходячи з досліджень, приведених вище (9)-(12), отримаємо наступне:

$$E_k = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} A_{\frac{N}{2}} & A_{\frac{N}{2}} \\ B_{\frac{N}{2}} & -B_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{\frac{N}{2}} & K_{\frac{N}{2}} \\ K_{\frac{N}{2}} & -K_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 2A_{\frac{N}{2}}K_{\frac{N}{2}} & 0 \\ 0 & 2B_{\frac{N}{2}}K_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де права частина (13) допускає розширення до матриці перетворення високого порядку, а ліва – це матриця прямого перетворення порядку  $N$ ;  $A$ ,  $B$  і  $C$  – підматриці ОРП.

Повторення процесу  $\log_2 N$  разів дає загальний вигляд, заданий формулою:

$$E_N = \begin{bmatrix} \frac{N}{2}C_2K_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{2}C'_2K_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N}{4}A''_4K_4 & \dots & 0 & 0 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \dots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 4B_{\frac{N}{4}}K_{\frac{N}{4}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 2B_{\frac{N}{2}}K_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Рівняння (14) показує, що матриці ОРП і оберненого ОРП є розрідженими матрицями, причому дві третини їх елементів дорівнюють нулю; отже, пряма реалізація кожної окремої матриці включатиме множення  $N^2/3$  і  $N(N-1)/3$  тоді як прямий розрахунок ООРП у вигляді розділених каскадних перетворень включатиме сумарні множення  $N^2$  і  $2N(N-1)$  сумарних додавання. Дійсні операції цифрової обробки сигналів можуть бути обчислені на основі того, що складність одного сумарного множення еквівалентна або складності чотирьох дійсних множень, або двох дійсних додавань (4/2), або складності трьох дійсних множень і трьох дійсних додавань (3/3). Прийmemo критерій (4/2). Більше того, одне сумарне додавання вважається еквівалентним двом дійсним додаванням. Це означає, що для реалізації вдосконаленого перетворення Фур'є потрібно

$$\Theta_M^{OOP} = \frac{4}{3}N^2, \quad (15) \quad \Theta_D^{OOP} = \frac{4}{3}N^2 - \frac{2}{3}N, \quad (16)$$

де  $\Theta_M$  і  $\Theta_D$  означають дійсні множення і дійсні додавання відповідно.

З іншого боку, реалізація ОДПФ, коли воно використовується, як розділені каскадні перетворення, вимагає

$$\Theta_M^{ЗДПФ} = 4N^2, \quad (17) \quad \Theta_D^{ЗДПФ} = 4N^2 - 2N. \quad (18)$$

Отже, сумарні дійсні додавання, необхідні в перетвореннях із врахуванням (15)-(18):

$$\Sigma\Theta^{ЗШПФ} = 11[N \log_2(N)], \quad \Sigma\Theta^{ООРП} = 13[N \log_2(N) - (2N - 2)].$$

Коефіцієнт ефективності (КЕ) вдосконаленого ООРП і ЗШПФ приведений в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння загальної кількості операцій цифрової обробки сигналів (включаючи корекцію)

N	ООРП	ЗШПФ	КЕ, %
64	3084	4212	24.3
256	18444	22516	17.96
1024	98316	112628	11.04

Проведемо дослідження впливу вдосконаленої OFDM-системи на значення ВСШ (відношення сигнал/шум) з використанням каналу з частотно-вибірковими завмираннями. Імітаційні моделювання будемо проводити з використанням універсальної системи блокового імітаційного візуального математичного моделювання VisSim [16]. Разом з самою системою VisSim випущений ряд пакетів її розширення, що істотно підвищують і без того великі можливості системи. До них відноситься пакет VisSim Communications для моделювання процесів, що проходять у телекомунікаційних системах та мережах.

Коефіцієнт бітових помилок (КБП) каналу OFDM-системи з ОРП і частотно-вибірковими завмираннями з QPSK і 16-QAM з використанням критерію мінімізації середньоквадратичної помилки (МСП) оцінюється як

$$P_{QPSK}^{fs} = \frac{e}{m} Q\left(\sqrt{2\mathfrak{S}^{МСП}} \sin \frac{\pi}{M}\right), \quad P_{16QAM}^{ff} = \frac{4-2^{\frac{2-m}{2}}}{m} Q\left(\sqrt{\frac{3\mathfrak{S}^{МСП}}{M-1}}\right),$$

де  $\mathfrak{S}^{МСП}$  – ВСШ з використанням критерію мінімізації середньоквадратичної помилки.

Відповідні порівняльні характеристики та графіки приведені на рис. 1 і рис. 2.

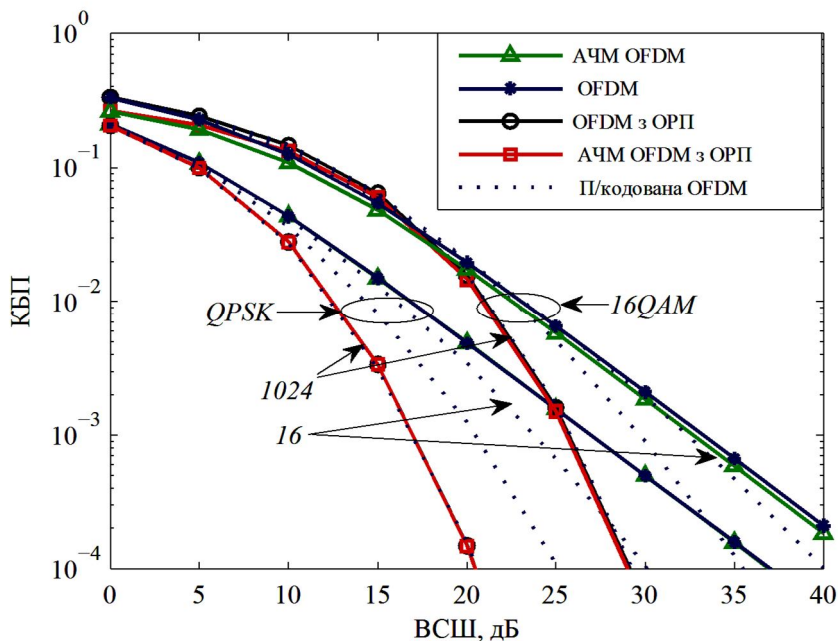


Рис. 1. КБП OFDM-системи з ОРП, попередньо кодованої OFDM-системи та звичайної OFDM-системи через пішохідну модель каналу МСЕ-Б, з QPSK та 16-QAM, використовуючи МСП-еквалайзер

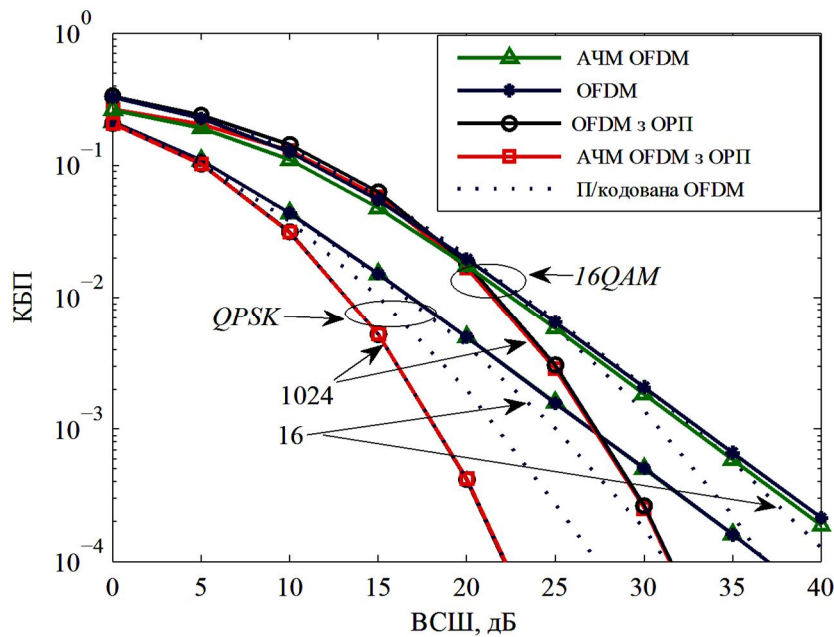


Рис. 2. КБП OFDM-системи з ОРП, попередньо кодованої OFDM-системи та звичайними OFDM-системи через автомобільну модель каналу МСЕ-А, з QPSK і 16-QAM, використовуючи МСП-еквалайзер

### Висновки

Виходячи з (2) і (12) через ортогональність звичайна OFDM і OFDM-системи з ОРП мають ідентичну ефективність по моделі каналу АБШГ з QPSK і 16-QAM. При розрахунку коефіцієнта ефективності ООРП і ЗШПФ характеристики ефективності знаходяться в діапазоні від 11 до 24 %.

Для вирішення проблеми з нульовим субканалом, яка впливає на ефективності OFDM-системи з ОРП використано критерій МСП. Таким чином, навіть при низькому ВСШ, OFDM-системи з ОРП випереджає звичайну систему OFDM з модуляцією QPSK шляхом досягнення ВСШ близько 17 дБ, вимірюваного при значенні  $10^{-4}$  КБП, при використанні пішохідної моделі каналів МСЕ-Б і автомобільної МСЕ-А. Покращання КБП є наслідком частотного рознесення, досягнутого ОРП. Цей показник допомагає пом'якшити ефект глибокого завмирання на окремих субканалах.

Як вказано в [13], традиційна OFDM має недолік, оскільки символ, переданий по  $k$ -му субканалі, не може бути відновлений, коли він потрапляє в нуль канал (тобто  $H_k = 0$ ). Це не відноситься до OFDM-системи з ОРП, оскільки кожен символ передається по багатьох субканалах.

Проте, з 16-QAM OFDM-система перевершує OFDM-системи з ОРП при низькому відношенні ВСШ в результаті того, що загальний отриманий ВСШ через канали завмирання Релея розподіляється між різними сигналами розробленого перетворення.

Однак, слід враховувати, що при високому ВСШ OFDM-системи з ОРП перевершує традиційну систему OFDM шляхом досягнення відношення ВСШ близько 10 дБ, вимірюваного при  $10^{-4}$  КБП. Очевидно, що попередньо кодована OFDM, яка використовує матрицю  $N \times N$  КПФ в якості лінійного попереднього кодера і вдосконалена OFDM мають однакові характеристики.

**Список використаної літератури**

1. Прийнятий міжнародний стандарт 5G // Державний університет телекомунікацій. – <http://www.dut.edu.ua/ua/news-1-561-6080>.
2. Mogensen P. 5G small cell optimized radio design / P. Mogensen, K. Pajukoski, E. Tirola // [https://www.researchgate.net/publication/269304509\\_5G\\_small\\_cell\\_optimized\\_radio\\_design](https://www.researchgate.net/publication/269304509_5G_small_cell_optimized_radio_design).
3. Тихвинский В. Развитие архитектуры сетей 5G / В. Тихвинский, Г. Бочечка, А. Минов, А. Бабин // Connect. – 2017. – № 1-2. – С. 52-58.
4. Толубко В. Б. Оптимальний демодулятор для некогерентного прийому сигналів із фазорізницевою модуляцією другого порядку / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Н. В. Коршун, О. А. Хахлюк // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2017. – №4(48). – С. 5-11.
5. Poole I. 5G technology tutorial includes / Ian Poole // <http://www.radio-electronics.com>.
6. Chin W. Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks / W. Chin, F. Zhong, R. Haines // IEEE Wireless Communication. – 2017. – Vol. 21, №2. – PP. 106-112.
7. Andrews J. What will 5G be? / J. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. Soong, J. Zhang // IEEE J. Select. Areas Communication. – 2017. – Vol. 32, №6. – PP. 1065-1082.
8. Sahin A. A survey on multi-carrier communications: Prototype filters, lattice structures, and implementation aspects / A. Sahin, I. G'uvenc, H. Arslan // IEEE Commun. Surveys Tutorials. – 2017. – Vol. 16, №3. – PP. 1312-1338.
9. Banelli P. Modulation formats and waveforms for 5G net-works: Who will be the heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency / P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe, A. Modenini, F. Rusek, A. Ugolini // IEEE Signal Process. Mag. – 2017. – Vol. 31, №6. – PP. 80-93.
10. Technical specification 36.212./ 3GPP // [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136212/12.02.00\\_60/ts\\_136212v120200p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/12.02.00_60/ts_136212v120200p.pdf).
11. Matz G. Time-Frequency Foundations of Communications / G. Matz, H. Bolcskei, F. Hlawatsch // IEEE Signal Processing Mag. – 2016. – Vol. 30, №6. – PP. 87-96.
12. Datta R. GFDM interference cancellation for flexible cognitive radio PHY design / R. Datta, N. Michailow, M. Lentmaier, G. Fettweis // IEEE Vehicular Technology Conference. – 2016. – Vol. 29, №4. – PP. 50-58.
13. Michailow N. Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks / N. Michailow, M. Matthe, I. Gaspar, L. Caldevilla, A. Mendes, G. Festag, G. Fettweis // IEEE Transactions on Communications. – 2017. – Vol. 62, №9. – PP. 1102-1108.
14. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов / В. А. Галкин. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2007. – 432 с.
15. Залманзон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – Москва: Наука, 1989. – 496 с.
16. Дьяконов В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование / В. П. Дьяконов. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.

**References (MLA)**

1. "Adopted International 5G Standard." *State University of Telecommunications*. <http://www.dut.edu.ua/ua/news-1-561-6080>. Web. 3 Mar. 2018.
2. Mogensen P., Pajukoski K., and Tirola E. "5G Small Cell Optimized Radio Design." [https://www.researchgate.net/publication/269304509\\_5G\\_small\\_cell\\_optimized\\_radio\\_design](https://www.researchgate.net/publication/269304509_5G_small_cell_optimized_radio_design). Web. 3 Mar. 2018.



3. Tykhvynskyy V., Bochechka H., Mynov A., and Babyn A. "Development of 5G Network Architecture." *Connect* 1-2 (2017): 52-58. Print.
4. Tolubko V. B., Berkman L. N., Korshun N. V., and Khakhliuk O.A. "Optimum Demodulator for Incoherent Reception of Signals with Phase-Difference Modulation of the Second Order." *Naukovi zapysky Ukrainського naukovo-doslidnogo instytutu zviazku* (48). (2017): 5-11. Print.
5. Poole I. "5G Technology Tutorial Includes." <http://www.radio-electronics.com>. Web. 24 Feb. 2018.
6. Chin W., Zhong F., and Haines R. "Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks." *IEEE Wireless Communication*. 21(2) (2017): 106-112. Print.
7. Andrews J., Buzzi S., Choi W., Hanly S., Lozano A., Soong A., and Zhang J. "What Will 5G Be?" *IEEE J. Select. Areas Communication* 32(6) (2017): 1065-1082. Print.
8. Sahin A., G'uvenc I., and Arslan H. "A Survey on Multi-Carrier Communications: Prototype Filters, Lattice Structures, and Implementation Aspects." *IEEE Communication Surveys Tutorials* 16(3) (2017): 1312-1338. Print.
9. Banelli P., Buzzi S., Colavolpe G., Modenini A., Rusek F., and Ugolini A. "Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM? An Overview of Alternative Modulation Schemes for Improved Spectral Efficiency." *IEEE Signal Processing Mag.* 31(6) (2017): 80-93. Print.
10. "Technical Ipecification 36.212. 3GPP." [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136212/12.02.00\\_60/ts\\_136212v120200p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/12.02.00_60/ts_136212v120200p.pdf). Web. 24 Feb. 2018.
11. Matz G., Bolcskei H., and Hlawatsch F. "Time-Frequency Foundations of Communications." *IEEE Signal Processing Mag.* 30(6) (2016): 87-96. Print.
12. Datta R., Michailow N., Lentmaier M., and Fettweis G. "GFDM Interference Cancellation for Flexible Cognitive Radio PHY Design." *IEEE Vehicular Technology Conference*. 29(4) (2016): 50-58. Print.
13. Michailow N., Matthe M., Gaspar I., Caldevilla L., Mendes A., Festag G., and Fettweis G. "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks." *IEEE Transactions on Communications* 62(9) (2017): 1102-1108. Print.
14. Halkyn V. A. *Digital Mobile Radio Communication. Educational Manual for High Schools*. Moscow: Goryachaya lynyua-Telekom, 2007. Print.
15. Zalmanzon L. A. *Fourier, Walsh, and Haar Transformations and Their Application in Management, Communication and Other Fields*. Moscow: Nauka, 1989. Print.
16. D'yakonov V. P. *VisSim+Mathcad+MATLAB. Visual Mathematical Modeling*. Moscow: SOLON-Press, 2004. Print.

*Автор статті*

**Макаренко Анатолій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри мобільних і відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (97) 509 00 33. E-mail: makarenkoa@ukr.net

*Author of the article*

**Makarenko Anatolii Oleksandrovych** – candidate of sciences (technic), assistant professor of mobile and video information technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (97) 509 00 33. E-mail: makarenkoa@ukr.net

Дата надходження

в редакцію: 14.03.2018 р.

Рецензент:

доктор технічних наук, професор Л. Н. Беркман  
*Державний університет телекомунікацій, Київ*