

ПЯТИН І.С.

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-1898-6755  
e-mail: ilkhmel@ukr.net

ГАВРОНСЬКИЙ В.Є.

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0002-1529-1272  
e-mail: gavronskiy@gmail.com

ЛУЖАНСЬКИЙ В.І.

Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-2698-3450  
e-mail: luzhanskiy56@gmail.com

МИХАЛЬЧУК В.О.

Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-2924-2041  
e-mail: 1306vadim1306@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З СИГНАЛАМИ F-OFDM

Системи зв'язку п'ятого покоління (5G) забезпечують збільшення швидкості передачі даних, використання наднадійного зв'язку із малою затримкою (URLLC), мають високу спектральну ефективність, широкі можливості підключення та підвищену енергоефективність. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і фільтром (F-OFDM) є сигналом, який отримують на виході фільтра. F-OFDM порівняно з OFDM забезпечує зниження позасмугового випромінювання, що покращує характеристики системи. Стаття присвячена порівнянню сигналів CP-OFDM і F-OFDM.

Ключові слова: сигнали CP-OFDM, сигнали F-OFDM, спектральна густина потужності, sinc-фільтр, ймовірність помилки на біт.

PYATIN I.S., GAVRONSKIY V.E.

Khmelnitskyi Politechnic Professional College by Lviv Politechnic National University

LUZHANSKIY V.I., MIKHALCHUK V.O.

Khmelnitskyi National University

## RESEARCH COMMUNICATION SYSTEMS WITH F-OFDM SIGNALS

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) signals are widely used in modern mobile standards. They have a number of disadvantages, such as the high ratio of peak power to average power (PAPR), large out-of-band components of the sinc shape spectrum, and the like. OFDM provides high spectrum efficiency due to orthogonal frequency multiplexing. To achieve orthogonality and avoid interference, it is necessary to align the signals of the transmitter and receiver in time and frequency. Imperfect synchronization can lead to suboptimal performance. Fifth generation (5G) communication systems promise several advantages over previous systems, including high data rates, ultra-low latency (URLLC), high spectral efficiency, extensive connectivity, and increased energy efficiency. In addition, machine-type (MTC) and Internet of Things (IoT) communication is expected to be handled better and more efficiently by the 5G system. Multiplexing with orthogonal frequency division multiplexing and a filter (F-OFDM) is a multi-carrier signal that is received at the output of the filter. F-OFDM in comparison with OFDM provides reduction of out-of-band radiation that allows to use the allocated spectrum effectively. Filtration is an effective way to suppress side petals in OFDM. As the side lobes of the spectrum decrease, a large amount of signal power is concentrated in the main lobe, which helps to reduce interference between channels. The mathematical description of signals CP-OFDM, Windowed OFDM, Filtered OFDM in the field of time and frequency is analyzed in the work. A study of the transmission and reception of F-OFDM signals. The requirements for the filter and its characteristics in the field of time and frequency are given. The block diagrams of the transmitter and receiver are given. In F-OFDM, the CP-OFDM signal is passed through the developed filter. Because the filter bandwidth corresponds to the signal bandwidth, only a few subcarriers close to the boundary are affected. The key consideration is that the length of the filter may exceed the length of the cyclic prefix for F-OFDM. The resulting inter-character interference is minimized due to the design of the filter using windows. The received signal passes through a matched filter and then through a conventional CP-OFDM receiver. It takes into account both the increase in filtration and the delay before the FFT operation. The spectra of CP-OFDM and F-OFDM signals were compared. The dependences of the error error per bit on the signal-to-noise ratio for F-OFDM signals have been studied.

Keywords: CP-OFDM signals, F-OFDM signals, power spectral density, sinc filter, bit error ratio.

### Постановка проблеми

Сигнали OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) широко використовуються у сучасних стандартах мобільного зв'язку. Вони мають ряд недоліків, таких як високе відношення пікової потужності до середньої потужності (PAPR), великі позасмугові компоненти спектру форми sinc, тощо. Оскільки OFDM забезпечує високу ефективність використання спектра за рахунок ортогонального частотного мультиплексування, його позасмугове випромінювання може бути неприйнятним без захисних смуг [1]. Зокрема, в 4G LTE близько 10% виділеної смуги пропускання зарезервовано як захисну смугу для уникнення завад між каналами. Щоб досягти ортогональності та уникнути міжсимвольних чи каналних завад, необхідно суворе вирівнювання за часом та частотою. Це призводить до ускладнень передачі сигналів для досягнення ідеальної синхронізації, особливо для передачі по висхідній лінії зв'язку. Недосконала синхронізація може призвести до неоптимальної продуктивності. Нове покоління систем мобільного зв'язку буде мати більш високі швидкості передачі даних, малу затримку та підтримку великої кількості пристроїв.

Крім цього, очікується, що зв'язок машинного типу (МТС) та Інтернет речей (IoT) будуть оброблятися системою 5G краще та ефективніше. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і фільтром (F-OFDM) є сигналом з декількома несучими, який отримують на виході добре спроектованого фільтра. F-OFDM порівняно з OFDM забезпечує зниження позасмугового випромінювання, що дозволяє ефективно використовувати виділений спектр.

Різноманітні системи п'ятого покоління (5G) мають низку переваг у порівнянні з попередніми системами, включаючи високу швидкість передачі даних, наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC), високу спектральну ефективність, широкі можливості підключення та підвищену енергоефективність [2]. Фільтрація - це перевірений та ефективний спосіб придушення бічних пелюсток у OFDM. Коли бічні пелюстки спектру зменшуються, велика потужність сигналу концентрується в головній пелюсті, що допомагає знизити потужність витoku у суміжному каналі.

Авторами роботи [1] встановлено, що оскільки OFDM забезпечує високу ефективність використання спектра за рахунок ортогонального частотного мультиплексування, його позасмугове випромінювання може бути неприйнятним без захисних смуг. Частотні та часові ресурси OFDM рівномірно розділені на декілька елементів рівного розміру для перенесення інформації. Щоб досягти ортогональності та уникнути міжсимвольних чи каналних завад, необхідно суворе вирівнювання за часом та частотою. Фільтрація - це перевірений та ефективний спосіб придушення бічних пелюсток у OFDM [2-5].

**Аналіз останніх джерел.** У роботах [1-3] було показано перевагу фільтрованого OFDM над звичайним OFDM з точки зору придушення бічних пелюсток. Автори створили математичну модель для системи OFDM з фільтром, і OFDM з багатошвидкісною фільтрацією. У зазначених роботах відсутні дані про залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для F-OFDM системи зв'язку з різними видами модуляції і ефективність систем F-OFDM.

**Метою роботи є:** дослідження блоків передачі і приймання сигналів F-OFDM, дослідження бітрової помилки систем зв'язку з сигналами F-OFDM при малих відношеннях сигнал-шум, дослідження спектральної ефективності F-OFDM у порівнянні з CP-OFDM.

#### Математичний опис сигналів мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів в області часу і області частоти

Радіочастотні завади, які є сигналом, випромінюваним небажаним передавачем, можуть погіршити характеристики приймача. Рівень потужності завад на вході приймача (вихід ПЧ) визначається виразом: [4]

$$I = P_T - L_{FL,T} + G_T + G_R - L_{FL,R} - L_{POL} - L_P - L_{FDR} \quad (1)$$

де  $P_T$  - вихідна потужність передавача в дБВт,  $L_{FL,T}$  - втрати у фідерній лінії між виходом передавача і входом передавальної антени,  $G_T$  і  $G_R$  - коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен,  $L_{FL,R}$  - втрати у фідерній лінії між виходом приймальної антени та входом приймача;  $L_{POL}$  - втрати через неузгодженість поляризації приймальної антени,  $L_P$  - втрати при поширенні (включаючи втрати через завади) між передавальною та приймальною антеннами  $L_{FDR}$  - втрати через FDR (Frequency Dependent Rejection - частотно-залежне придушення).

FDR (Frequency Dependent Rejection) - це міра придушення, що створюється кривою вибіркості приймача на частотах небажаного випромінювання передавача. FDR визначається виразом:

$$L_{FDR} = 10 \lg \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) \Psi(f - \Delta f) df} \quad (2)$$

де  $\Phi(f)$  - спектральна густина потужності (СГП) комплексної огибаючої сигналу радіозавад,  $\Psi(f)$  - нормалізована частотна характеристика приймача,  $\Delta f$  - частотне зміщення між передавачем, що заважає, і приймачем. Для ідеального плоского відгуку  $\Psi(f - \Delta f)$  для  $\Delta f - W_v / 2 \leq f \leq \Delta f + W_v / 2$ , FDR спрощується:

$$L_{FDR} = 10 \lg \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) df}{\int_{\Delta f - W_v / 2}^{\Delta f + W_v / 2} \Phi(f) df}, \quad (3)$$

де  $W_v$  - смуга пропускання приймача. Площа СГП сигналу дорівнює потужності сигналу, і, таким

чином, ми отримуємо рівняння:  $P_T = 10 \lg \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) df$ .

**Спектральна густина потужності сигналів CP-OFDM**

Переданий сигнал CP-OFDM основної смуги частот може бути описаний виразом:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} c_{n,k} p\left(t - n(T_s + T_g)\right) e^{-j2\pi k \frac{1}{N}(T_s + T_g)}, \quad (4)$$

де  $c_{n,k}$  – комплексний символ даних, модульований на  $k$ -й піднесучій  $n$ -го символу OFDM,  $p(t)$  – вікно формування імпульсу,  $T_{tot} = T_s + T_g$  – загальна тривалість символу  $T_s$  і  $T_g$  – тривалість символу даних та захисний інтервал, відповідно.

У припущенні, що комплексні сигнали на кожній піднесучій є статистично незалежними та взаємно ортогональними, вираз СГП сигналу OFDM з довільною формою імпульсу задається виразом [5, 6]:

$$\Phi_s(f) = \frac{P_s}{T_{tot}} \sum_{k=0}^{N-1} \left| P\left(f - \frac{k}{T_s}\right) \right|^2, \quad (5)$$

де  $P_s$  – дисперсія символів даних  $c_{n,k}$ , а також потужність однієї піднесучої OFDM,  $1/T_s$  – інтервал між піднесучими;  $P(f)$  – перетворення Фур'є вікна формування імпульсу. Застосовуємо прямокутне формування імпульсу до (6), що визначається виразом:

$$p(t) = \Pi\left(\frac{t - T_{tot}/2}{T_{tot}}\right), \quad (6)$$

де  $\Pi\left(\frac{t}{T_{tot}}\right) = \begin{cases} 0, & |t| > \frac{T_{tot}}{2} \\ \frac{1}{2}, & |t| = \frac{T_{tot}}{2} \\ 1, & |t| < \frac{T_{tot}}{2} \end{cases}$

Використовуючи властивість зсуву перетворення Фур'є в області часу,  $|P(f)|^2$  визначається виразом:

$$|P(f)|^2 = |F\{p(t)\}|^2 = \left| F\left\{ \Pi\left(\frac{t}{T_{tot}}\right) e^{-j\pi T_{tot} f} \right\} \right|^2 = T_{tot}^2 \text{sinc}^2(T_{tot} f), \quad (7)$$

де функція sinc визначається виразом:  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$  для  $x \neq 0$ , інакше вона дорівнює одиниці.

Комбінуючи (7) та (9), СГП CP-OFDM з прямокутним формуванням імпульсів визначається виразом:

$$\Phi_s^{(CP)}(f) = P_s T_{tot} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \text{sinc}\left[\left(f - \frac{k}{T_s}\right) T_{tot}\right] \right\}^2. \quad (8)$$

**Віконний OFDM**

Для придушення позасмугових випромінювань віконне OFDM використовує функції згладжування часових вікон для формування імпульсу. Як типовий приклад використовується функція піднесеного косинуса  $w_{rc}(t)$  тривалості  $T_w = T_{tot} + T_{tr}$ , яка визначається виразом:  $p(t) = w_{rc}\left(t - \frac{T_{tot}}{2}\right)$ ,

$$w_{rc}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |t| < (T_{tot} - T_{tr}) / 2 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos\left(\frac{\pi(|t| - (T_{tot} - T_{tr}) / 2)}{T_{tr}}\right) \right), & (T_{tot} - T_{tr}) / 2 \leq |t| < (T_{tot} + T_{tr}) / 2, \\ 0, & (T_{tot} + T_{tr}) / 2 \leq |t| \end{cases} \quad (9)$$

де  $T_{tr}$  - час переходу.

Виходячи з (5) та (9), СГП віконного OFDM задається виразом:

$$\Phi_s^{(w)}(f) = P_s T_{tot} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \operatorname{sinc} \left[ \left( f - \frac{k}{T_s} \right) T_{tot} \right] \frac{\cos \left( \pi T_{tr} \left( f - \frac{k}{T_s} \right) \right)}{1 - 4T_{tr}^2 \left( f - \frac{k}{T_s} \right)^2} \right\}^2. \quad (10)$$

### Фільтрований OFDM

Сигнал F-OFDM  $x(t)$  виходить шляхом пропускання сигналу CP-OFDM (4) через фільтр. Таким чином,  $x(t)$  визначається згортокою  $s(t)$  та імпульсною характеристикою фільтра  $h(t)$ :

$$x(t) = s(t) * h(t) \quad (11)$$

Дія фільтра полягає у застосуванні функції часового вікна  $w(t)$  до імпульсної характеристики фільтра:

$$h(t) = g(t) \cdot w(t), \quad (12)$$

де  $g(t) = W_g \operatorname{sinc}(W_g t)$ .

Частотна характеристика  $g(t)$  є прямокутним вікном з смугою пропускання  $W_g$ , тобто  $\Pi(f / W_g)$ .

Для придушення позасмугових випромінювань базовий фільтр обмежується за рахунок застосування функцій часового вікна, таких як вікно Хеннінга, Хеммінга та Блекмана. Як типовий приклад приймається вікно Хеннінга тривалості  $T_w$ , задане наступним чином:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left( \frac{2\pi |t|}{T_w} \right), & |t| \leq \frac{T_w}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T_w}{2} \end{cases} \quad (13)$$

СГП відфільтрованого сигналу OFDM визначається виразом:

$$\Phi_x(f) = \frac{P_s T_{tot}}{16\pi^2} [2\operatorname{Si}(\pi f_u) - 2\operatorname{Si}(\pi f_l) + \operatorname{Si}(\pi - \pi f_l) - \operatorname{Si}(\pi - \pi f_u) + \\ + \operatorname{Si}(\pi + \pi f_u) - \operatorname{Si}(\pi + \pi f_l)]^2 \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \operatorname{sinc} \left[ \left( f - \frac{k}{T_s} \right) T_{tot} \right] \right\}^2 \quad (14)$$

де  $f_u = T_w (f + W_g / 2)$  і  $f_l = T_w (f - W_g / 2)$ .

### Експериментальні дослідження

Порівняємо модуляцію OFDM з фільтром (F-OFDM) із загальною модуляцією OFDM з циклічним префіксом (CP-OFDM) за допомогою Matlab. Для F-OFDM до символу OFDM в часовій області застосовується смуговий фільтр для обмеження спектра і зменшення позасмугового випромінювання сигналу з збереженням ортогональності піднесучих. Визначимо параметри для проведення моделювання:

- смуга пропускання: 10 МГц;
- розрядність ШПФ: 1024;
- кількість піднесучих в блоці ресурсів: 12;
- довжина циклічного префікса: 72 відліка.

Фільтрація для F-OFDM повинна задовольняти наступним критеріям:

- плоска смуга пропускання для піднесучих;
- різка перехідна смуга для мінімізації захисних смуг;
- достатнє загасання в смузі затримування.

Цим критеріям задовольняє фільтр з прямокутною частотною характеристикою, тобто сінк-імпульсною характеристикою. Фільтр нижніх частот реалізований з використанням вікна, яке ефективно обрізає імпульсну характеристику і виконує плавні переходи до нуля на обох кінцях [3].

Фільтр прямої форми з кінцевою імпульсною характеристикою, спроектований у Матлаб містить:

- помножувачі – 511;
- підсумовувачі – 510.

Імпульсна характеристика фільтра представлена на рис. 1, АЧХ фільтра представлена на рис. 2.

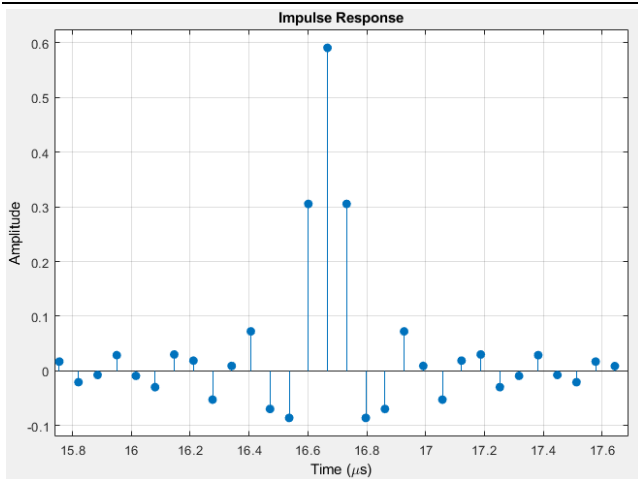


Рис. 1. Імпульсна характеристика формуючого фільтра

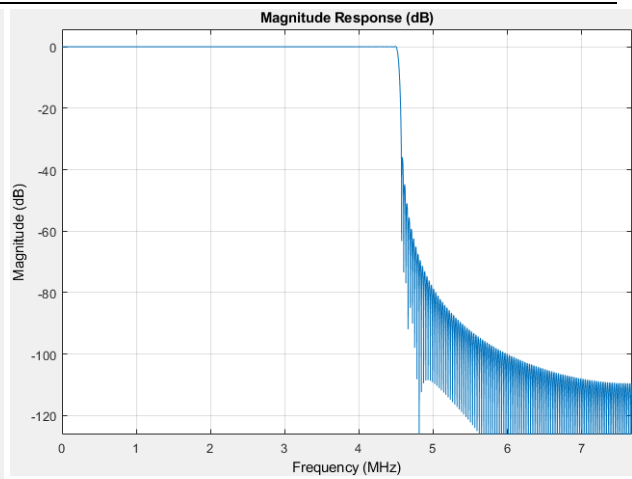


Рис. 2. АЧХ формуючого фільтра

**Передавач сигналу F-OFDM**

У F-OFDM сигнал CP-OFDM пропускається через розроблений фільтр. Оскільки смуга пропускання фільтра відповідає смузі пропускання сигналу, зачіпаються тільки декілька піднесучих, близьких до границі. Ключовим міркуванням є те, що довжина фільтра може перевищувати довжину циклічного префікса для F-OFDM [1]. Міжсимвольні завади зводяться до мінімуму завдяки конструкції фільтра з використанням вікон.

Структурна схема передавача F-OFDM представлена на рис. 3.

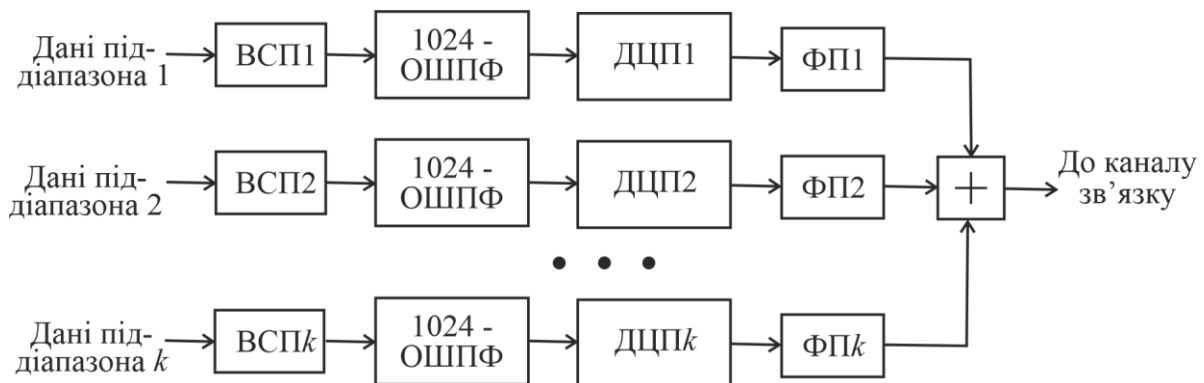


Рис. 3. Передавач F-OFDM (ВСП – відображення символів піддіапазона; 1024-ОШПФ – 1024-точкове обернене швидке перетворення Фур'є; ДЦП – додавання циклічного префікса; ФП – фільтр піддіапазона)

Порівняння спектральних густин сигналів F-OFDM і CP-OFDM представлено на рис. 4.

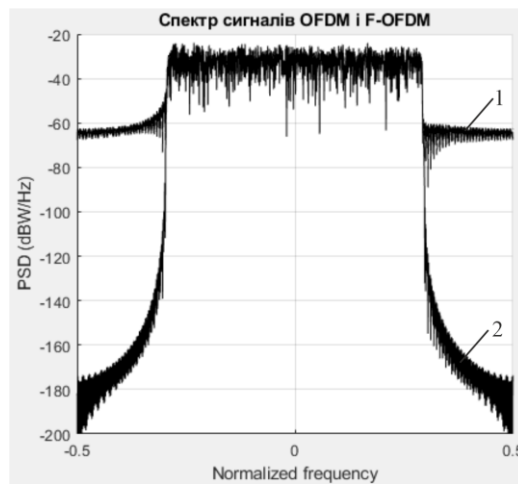


Рис. 4. Спектральна густина сигналів: 1 – CP-OFDM; 2 - F-OFDM

Порівнюючи графіки спектральних густин для схем CP-OFDM і F-OFDM, можна сказати, що сигнал F-OFDM має більш низькі (на 130 дБ) бічні пелюстки, ніж OFDM. Це зменшує позасмугове випромінювання і дозволяє ефективніше використовувати виділений спектр, що призводить до збільшення спектральної ефективності.

### Приймач сигналу F-OFDM

Прийнятий сигнал проходить через узгоджений фільтр, а потім через звичайний приймач CP-OFDM. Циклічний префікс враховує як наростання сигналу при фільтрації, так і затримку для операції ШПФ.

Операції обробки на боці приймача F-OFDM показані на рис. 5.

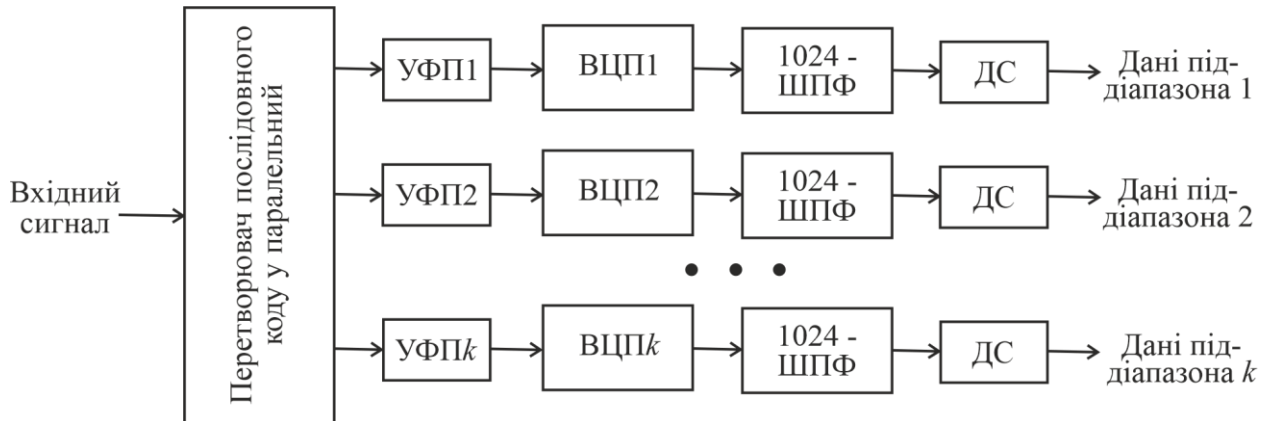


Рис. 5. Структурна схема приймача сигналу F-OFDM (УФП – узгоджений фільтр піддіапазона; ВЦП – видалення циклічного префікса; 1024-ШПФ – 1024-точкове швидке перетворення Фур'є; ДС – детектування сигналу)

Для формування сигналу F-OFDM додається етап фільтрації до існуючої обробки CP-OFDM як на передавальному, так і на приймальному боці.

Результати проведеного дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для F-OFDM системи зв'язу з різними видами модуляції приведені на рис. 6. Дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для F-OFDM і CP-OFDM систем зв'язу з модуляцією QPSK приведені на рис. 7.

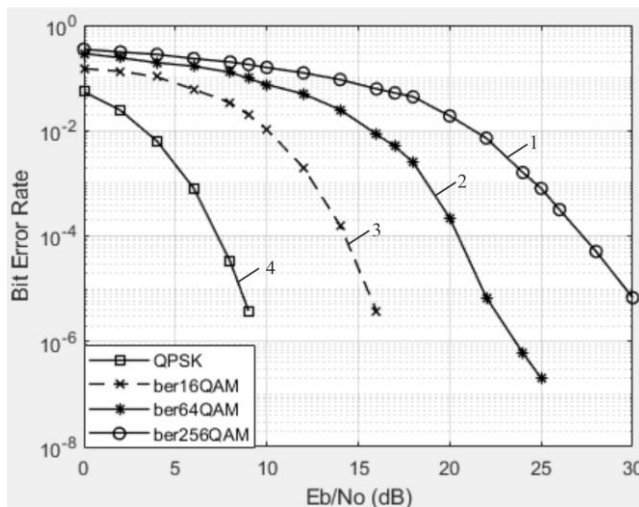


Рис. 6. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для F-OFDM системи зв'язу з модуляцією (1 – 256QAM; 2 – 64-QAM; 3 – 16QAM; 4 – QPSK)

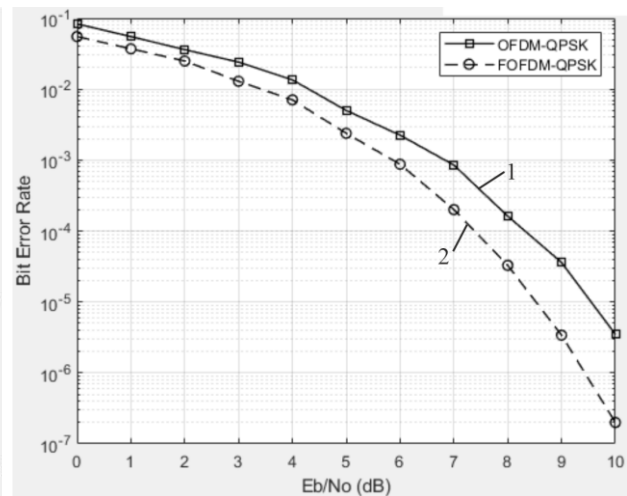


Рис. 7. Залежність ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для: 1 – CP-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK; 2 – F-OFDM системи зв'язу з модуляцією QPSK

### Висновки

У статті проаналізований математичний опис сигналів мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (CP-OFDM, віконний OFDM, F-OFDM) в області часу і області частоти. Спроекований формуючий КІХ фільтр з смугою пропускання 10 МГц, що обмежує спектр на боці передавача і боці приймача. Проведене порівняння модуляції F-OFDM з модуляцією CP-OFDM. Порівнюючи графіки спектральних густин для схем CP-OFDM і F-OFDM, можна сказати, що сигнал F-OFDM має більш низькі (на 130 дБ) бічні пелюстки, ніж OFDM. Це зменшує позасмугове випромінювання і дозволяє ефективніше використовувати виділений спектр, що призводить до збільшення спектральної ефективності. Проведене дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для F-OFDM системи зв'язу з різними видами модуляції. Це дозволяє зробити висновок, що найбільш ефективним є використання модуляції QPSK. Для збільшення швидкості передачі інформації у 4 рази (з 2 біт на символ – QPSK до 8 біт на символ – 256QAM) необхідно збільшувати відношення сигнал-шум на боці приймача на 22 дБ для  $BER=10^{-6}$ . Проведене дослідження залежностей ймовірності помилки на біт (BER) від відношення сигнал/шум ( $E_b/N_0$ ) для CP-OFDM і F-OFDM систем зв'язу з модуляцією QPSK. Це

дозволяє зробити висновок, що F-OFDM на 1 дБ ефективніше, ніж CP-OFDM для BER=10<sup>-6</sup>.

### Література

1. Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, and Jing Qiu, "Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks", in Proc.2015 IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
2. Hugu Tulberg et'al "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements", IEEE Communications Magazine Volume: 54, Issue: 12, Dec 2016.
3. J. Park, E. Lee, S. Park, S. Raymond, S. Pyo and H. Jo, "Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.
4. Пятін І.С. Моделювання спотворень сигналу у каналі передачі / І.С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 5. – С. 39–45.
5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4)
6. Пятін І.С. Передача управляючої інформації у системах широкосмугових телекомунікацій технології 5G / Ю. Бойко, І. Пятін, Л. Карпова І. Пархомей // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – 2021 – № 1 (38). – С. 82–95. – DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.38.2021.233200>
7. Пятін І.С. Дослідження низхідної лінії зв'язку 5G / І.С. Пятін, Ю.М. Бойко // Праці VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негаусівських процесів» 25-26 травня 2021 р., м Черкаси, 2021. – С. 68–70.
8. J. Boiko, V. Tolubko, O. Barabash, O. Eromenko and Y. Havrylko, "Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications", *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no 4, pp. 2025-2038, August 2019.
9. Бойко Ю.М. Особливості квазікогерентної обробки сигналів у засобах телекомунікацій з частотною маніпуляцією / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. – № 1. – С. 107–119.
10. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – Київ : Логос, 2018. – 227 с. – URL : <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291>.
11. Zhurakovskiy B., Boiko J., Druzhynin V., Zeniv I., and Eromenko O. "Increasing the efficiency of information transmission in communication channels," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 3, September 2020, pp. 1306-1315. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1306-1315>.

### References

1. Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, and Jing Qiu, "Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks", in Proc.2015 IEEE GLOBECOM, San Diego, CA, 2015, pp. 1-6.
2. Hugu Tulberg et'al "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements", IEEE Communications Magazine Volume: 54, Issue: 12, Dec 2016.
3. J. Park, E. Lee, S. Park, S. Raymond, S. Pyo and H. Jo, "Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.
4. Piatin I.S. Modeliuvannya spotvoren syhnalu u kanali peredachi/ I.S. Piatin, D.A. Makaryshkin // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. - 2020. - №5. – S. 39-45.
5. Boiko J., Pyatin I., Karpova L., Eromenko O. (2021) Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate. In: Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_4)
6. Piatin I.S. Peredacha upravliaiuchoi informatsii u systemakh shyrokosmuhovykh telekomunikatsii tekhnologii 5G /Iu. Boiko, I. Piatin, L. Karpova I. Parkhomei, // Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia», 2021 – №1 (38). – S. 82-95. DOI:<https://doi.org/10.20535/1560-8956.38.2021.233200>
7. Piatin I.S. Doslidzhennia nyzkhidnoi linii zviazku 5G / I.S. Piatin, Yu.M. Boiko // Pratsi VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Obrobka syhnaliv i nehausivskykh protsesiv» 25-26 travnia 2021 r., m Cherkasy, 2021 – s.68-70
8. J. Boiko, V. Tolubko, O. Barabash, O. Eromenko and Y. Havrylko, "Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications", *Telkommika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no 4, pp. 2025-2038, August 2019.
9. Boiko J. M. Osoblyvosti kvazikoherentnoi obrobky syhnaliv u zasobakh telekomunikatsii z chastotnoiu manipuliatsiieiu / J.M. Boiko, I.S. Piatin // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii №1, 2018 – S. 107-119.
10. Boiko J. M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavadostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavad : monoghrafija / J. M. Boiko, V. A. Druzhinin, S. V. Tolyupa. – Kyjiv : Loghos, 2018. – 227 s. URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6291>.
11. B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, and O. Eromenko, "Increasing the efficiency of information transmission in communication channels," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 3, September 2020, pp. 1306-1315. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1306-1315>.

Рецензія/Peer review : 25.09.2021 р.

Надрукована/Printed :10.10.2021 р.