

---

---

## ТЕХНОЛОГІЯ OFDM: ВІД ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ДО СЕРЦЯ 5G

професор, к.т.н., Воргуль О.В., студент Оніщенко А.

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
кафедра мікропроцесорних технологій і систем, м. Харків, Україна

e-mail: oleksandr.vorgul@nure.ua

### Abstract

The review considers orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) — a technology that has become the basis of modern high-speed communication systems. Its path from theoretical works of the 1960s to the status of a key physical layer technology in the Wi-Fi, 4G LTE and 5G NR standards is traced. The fundamental principles are analyzed: parallel transmission on orthogonal subcarriers, the use of FFT/SFFT and the role of the cyclic prefix in combating distortion. Special attention is paid to the adaptation of OFDM in the 5G NR standard, where the concept of flexible numerology made it possible to meet the diverse requirements of new services. The problems (high PAPR) and prospects of the technology are briefly discussed.

**Keywords:** OFDM, orthogonal subcarriers, FFT (SFFT), cyclic prefix (CP), 5G NR, numerology.

### Вступ

Ортогональне частотне поділення каналів (OFDM) є фундаментальною технологією цифрової модуляції для сучасних бездротових і провідних систем. Її здатність ефективно протистояти багатопроменевому поширенню при високій спектральній ефективності зумовила вибір OFDM для стандартів Wi-Fi, цифрового телебачення, 4G LTE та 5G NR. Мета цього звіту — пояснити, як історичний розвиток та базові принципи OFDM призвели до її домінування на фізичному рівні зв'язку, з фокусом на реалізацію в 5G New Radio.

### Історична еволюція та основні принципи

Ідея використання множини ортогональних піднесучах була математично обґрунтована Робертом Чангом у 1966 р. [1]. Ключовим проривом для практичної реалізації стала робота Вайнштейна та Еберта (1971 р.), що запропонували використовувати алгоритми ШПФ/ЗШПФ для цифрової генерації та обробки піднесучах, що перенесло складність реалізації в цифрову область [2]. Широке впровадження стало можливим із розвитком мікроелектроніки у 1980-90-х роках, розпочавшись з xDSL та DAB [3], а потім поширившись на Wi-Fi, DVB-T та 4G LTE. Вершиною стало прийняття OFDM/OFDMA в якості основи фізичного рівня для обох напрямків передачі у стандарті 5G NR [7].

Сутність OFDM — у вирішенні проблем багатопроменевості та спектральної ефективності. Високошвидкісний потік розбивається на  $N$  паралельних низькошвидкісних потоків, що передаються на ортогональних

піднесучах. Збільшення тривалості символу підвищує стійкість до міжсимвольної інтерференції (ISI). Ортогональність (крок  $\Delta f = 1 / T_u$ ) дозволяє розміщувати піднесучі щільно, без захисних інтервалів, максимізуючи використання смуги та виключаючи міжканальну інтерференцію (ICI) [3,6].

Для захисту від багатопроменевості використовується циклічний префікс (CP) — копія кінця символу, що додається на його початок. Приймач відкидає CP, що усуває ISI між символами. Оскільки відкинута частина — копія кінця символу, вплив каналу зводиться до множення переданого символу (у частотній області) на комплексний коефіцієнт для кожної піднесучої. Це дозволяє легко компенсувати спотворення (частотний еквалайзинг) і відновлює ортогональність, усуваючи ICI всередині символу. Довжина CP ( $T_{cp}$ ) обирається більшою за максимальну затримку в каналі, але її збільшення знижує корисну швидкість, створюючи компроміс при проектуванні [3,6,7].

Практична реалізація заснована на алгоритмах ШПФ/ЗШПФ, що виконують перетворення між частотною та часовою областями. Ефективність ШПФ зробила OFDM реалізованим, але висуває вимоги до обчислювальної потужності. Коректна робота також критично залежить від точної синхронізації та компенсації зсуву несучої частоти (CFO) [3,6].

### **OFDM у 5G New Radio: гнучкість та виклики**

Стандарт 5G NR висуває різноманітні вимоги: екстремальні швидкості (eMBB), наднизькі затримки (URLLC), підтримка масового IoT (mMTC). OFDM у формі OFDMA був обраний як основа фізичного рівня, підтвердивши свою гнучкість.

Ключовим нововведенням стала **гнучка нумерологія** [7]. Параметр  $\mu$  задає крок піднесучої  $\Delta f$  (15, 30, 60, 120, 240 кГц) та тривалість символу. Це дозволяє адаптувати систему до різних умов: малі кроки (15 кГц) для великих комірок; великі кроки (60-240 кГц) для високої мобільності, mmWave-діапазонів та зниження затримки (URLLC). Довжина CP також адаптується.

OFDM у 5G ефективно вирішує й інші завдання: агрегація піднесучах у дуже широкі смуги для гігабітних швидкостей eMBB; ідеальна сумісність з Massive MIMO, де обробка сигналу (еквалайзинг, формування променя) виконується незалежно для кожної піднесучої у частотній області [7].

Однак впровадження OFDM у 5G стикається з викликами:

1. **Високий PAPR:** Пікова потужність OFDM-сигналу значно перевищує середню, вимагаючи неефективних лінійних підсилювачів, особливо в мобільних пристроях. Для боротьби використовуються спеціальні методи, а для висхідного каналу в низці сценаріїв — схема DFT-s-OFDM з меншим PAPR [7].

2. **Жорсткі вимоги до синхронізації:** Великі  $\Delta f$  та вимоги URLLC потребують надзвичайно точних алгоритмів часової та частотної синхронізації, що реалізуються через спеціальні сигнали (PSS, SSS) та пілот-сигнали (DM-RS) [7].
3. **Вразливість до доплерівського зсуву:** В умовах екстремальної мобільності або mmWave доплерівський зсув може порушувати ортогональність, вимагаючи просунутих алгоритмів компенсації.

### **Висновок**

OFDM пройшла шлях від математичної концепції до технологічного базису цифрового зв'язку. Її успіх заснований на унікальному поєднанні високої спектральної ефективності (ортогональність) та стійкості до багатопроменевості (циклічний префікс), що реалізується завдяки алгоритмам ШПФ. У 5G NR OFDM підтвердив свою актуальність, а впроваджена гнучка нумерологія дозволила адаптувати технологію під суперечливі вимоги нових сервісів. Незважаючи на виклики (PAPR, синхронізація), ведуться активні дослідження щодо їх пом'якшення. Очікується, що принципи OFDM продовжуватимуть грати ключову роль в еволюції систем зв'язку, включаючи 5G Advanced та 6G.

### **Список використаних джерел**

1. Chang, R. W. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. *The Bell System Technical Journal*, 45(10), 1775–1796 (1966).
2. Weinstein, S. B., & Ebert, P. M. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 19(5), 628–634 (1971).
3. Proakis, J. G., & Salehi, M. *Digital Communications* (5th ed.). McGraw-Hill Education (2008).
4. IEEE Std 802.11-2020. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* (2021).
5. ETSI EN 300 744 V1.6.1: *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television* (2009).
6. Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* (2nd ed.). Academic Press (2014).
7. 3GPP TS 38.211 V17.4.0: *NR; Physical channels and modulation* (Release 17) (2022).