

УДК 621.391.26

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.029306

Кравченко В.І., к.т.н.; Борисенко І.І., к.т.н.;
Голубенко О.І., к.т.н.; Яковець В.П.,
Хаб'юк Н.С.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИГНАЛУ OFDM В МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ОСТАННІХ ПОКОЛІНЬ ПРИ ВПЛИВІ ЗАВАД

Kravchenko V.I., Borysenko I.I., Golubenko O.I., Yakovets V.P., Khabiuk N.S. Research of OFDM signal efficiency in latest generation mobile networks under interference. The article investigates the impact of subscriber mobility and frequency shifts on the behavior of multicarrier signals in modern wireless networks using OFDM approaches as an example. The mechanisms through which changes in speed and frequency synchronization errors lead to the appearance of intersymbol and intercarrier interference, as well as to degradation of reception quality, are considered. Based on analytical considerations, an approach is proposed for evaluating the trade-off between desired spectral efficiency and signal stability in conditions of user mobility. The concept of adapting the parameters of the multi-carrier signal depending on channel conditions and mobility is described, and practical methods that can reduce the negative effects of frequency shifts are discussed, from improving frequency localization to the use of adaptive signal processing schemes. It is emphasized that optimal solutions depend on the usage scenario and must take into account compatibility with existing standards and hardware limitations.

Keywords: LTE, OFDM, MIMO, Doppler effect, spectral efficiency

Кравченко В.І., Борисенко І.І., Голубенко О.І., Яковець В.П., Хаб'юк Н.С. Дослідження ефективності сигналу OFDM в мобільних мережах останніх поколінь при впливі завад. У статті досліджено вплив рухливості абонентів та частотних зсувів на поведінку багатонесучих сигналів у сучасних бездротових мережах на прикладі OFDM-підходів. Розглянуто механізми, через які зміни швидкості руху та похибки частотної синхронізації призводять до появи міжсимвольних і міжнесучих перешкод, а також до деградації якості прийому. На основі аналітичних міркувань запропоновано підхід до оцінки компромісу між бажаною спектральною ефективністю та стійкістю сигналу в умовах руху користувачів. Описано концепцію адаптації параметрів побудови сигналу з великою кількістю несучих в залежності від умов каналу та мобільності, а також обговорено практичні методи, які можуть зменшувати негативні наслідки частотних зсувів – від поліпшення частотної локалізації до застосування адаптивних схем обробки сигналу. Підкреслено, що оптимальні рішення залежать від сценарію використання та мають враховувати сумісність із існуючими стандартами й апаратними обмеженнями.

Ключові слова: LTE, OFDM, MIMO, ефект Доплера, спектральна ефективність

Вступ

Сучасні мобільні мережі дедалі інтенсивніше покладаються на мультикар'єрні методи модуляції для забезпечення високої спектральної ефективності та гнучкості радіоінтерфейсу. OFDM (ортогональне частотне розділення каналів) став базовим рішенням у системах LTE та 5G завдяки простоті демодуляції, стійкості до міжсимвольної інтерференції в багатошляхових каналах і можливості ефективного розподілу ресурсів між користувачами. Водночас практичні впровадження OFDM стикаються з низкою обмежень: вплив доплерівських зсувів при русі абонентів, залишкові помилки частотної синхронізації та компроміси між довжиною символу, спектральною локалізацією й енергетичною ефективністю.

OFDM-ансамбль – це «набір» OFDM-сигналів, який зазвичай розуміють як сукупність піднесучих або окремих реалізацій OFDM-символу, що використовуються разом для передачі даних або для статистичного аналізу системи. Фізичний (передавальний) ансамбль – набір K піднесучих, які разом утворюють один OFDM-символ: кожен піднесучу модулюють своїми символами, потім виконують IFFT (Фур'є-синтез) і отримують OFDM-сигнал. Тобто ансамбль OFDM-піднесучих це сукупність частотно-ортогональних імпульсів, що передаються в рамках одного символу; довжина FFT, довжина символу і циклічний префікс – важливі параметри такого ансамблю. Аналітичний/статистичний ансамбль – безліч реалізацій OFDM-сигналу (або наборів піднесучих), за якими усереднюють характеристики (наприклад, спектр, різноманітність спектру, ймовірності помилок тощо).

Попри широке використання технології OFDM у сучасних системах мобільного зв'язку, питання вибору оптимальних параметрів сигналу, зокрема розміру ансамблю піднесучих N , залишається відкритим. У більшості випадків цей параметр задається стандартом або обирається виходячи з компромісів між складністю реалізації та пропускну здатністю. Проте за умов руху абонента і наявності частотних зсувів (доплерівського ефекту, неточності синхронізації) ефективність передавання сигналу суттєво залежить від співвідношення між тривалістю OFDM-символу, шириною піднесучих і характеристиками каналу.

Аналіз останніх досліджень. У статті [1] показано підхід, який оцінює ефективний канал у домені затримки–Доплера (DD) для одного Zak-OTFS носія, реконструює з цього повну частотну характеристику і перетворює символи в CP-OFDM, щоб виконати низькокомплексне спільне вирівнювання всіх піднесучих. В [2] запропоновано схему DD-a-OFDM, що поєднує класичний OFDM-трансивер із оцінюванням каналу у домені затримки–Доплера (DD) та еквалізацією у часово-частотному (TF) домені. Підхід перетворює міжпіднесучі інтерференції (ICI) у гаусовий шум у DD-домені, забезпечує точніше оцінювання каналу з меншими витратами на пілоти та знижує BER порівняно з класичним OFDM, зберігаючи меншу складність, ніж OTFS. В [3] проведено порівняльне дослідження методів оцінювання зсуву частоти несучої (CFO) в системах OFDM і MIMO-OFDM. Автори запропонували підхід на основі машинного навчання з використанням KSVM, LDA та ANN-моделей, який перевищує традиційні методи за точністю (нижчий RMSE). Особливо ефективним виявився ANN-оцінювач для великих діапазонів, тоді як KSVM – для малих. Запропоновано також триетапний ML-підхід, що додатково підвищує точність CFO-оцінювання в умовах зашумлених каналів. В [4] запропоновано метод класифікації символів в приймачі OFDM-сигналу, що поєднує глибоке навчання (CNN) із метаевристичним алгоритмом Whale Optimization (WOA) для вибору найінформативніших ознак. В [5] продемонстровано широкосмугову OFDM-передачу на субміліметрових частотах (309 ГГц) із повністю електронним формуванням даних і несучої. Проведено експериментальне порівняння OFDM і однесучих сигналів при смугах 2 та 10 ГГц, де досягнуто швидкості 20 Гбіт/с для OFDM і 40 Гбіт/с для однесучого режиму. В [6] представлено двоетапний метод локалізації TDoA на основі OFDM-сигналів із вимірюванням фази несучої. Запропоновано спосіб розв'язання цілочисельних неоднозначностей, поєднуючи грубі оцінки з різниць фаз довгохвильових піднесучих в одному OFDM-символі з подальшими точними вимірюваннями на високих частотах. В [7] запропоновано метод зниження бітової помилки (BER) у OFDM-бекскатерних сенсорах, де основною проблемою є міжпіднесуча інтерференція (ICI), спричинена спектральним розтіканням. В [8] досліджено роботу системи AJSCC-OFDM (Analog Joint Source-Channel Coding на основі відображення Шеннона–Котельникова) в умовах зсуву частоти несучої (CFO), спричиненого невідповідністю генераторів передавача та приймача. Запропоновано спільну стратегію оптимізації S–K-відображення, що максимізує співвідношення сигнал/спотворення (SDR) за наявності CFO.

Постановка завдання. Побудувати аналітичну модель OFDM-сигналу з урахуванням впливу частотного зсуву та рухливості. Провести аналітичний розрахунок внесків корисного сигналу, ISI та ICI для різних значень N та відповідних конфігурацій (різна величина CP, різні частотні смуги та сценарії мобільності). Запропонувати універсальний критерій якості або функцію ефективності, що дозволяє порівнювати різні конфігурації ансамблю. Виконати чисельне моделювання/симуляції для типових сценаріїв LTE/5G з метою перевірки аналітичних висновків і забезпечення кількісного порівняння.

Метою роботи є формалізація впливу рухливості та частотних зсувів на продуктивність OFDM-сигналів і розробка практичних вказівок щодо вибору розміру ансамблю піднесучих.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розмір OFDM-ансамблю це число піднесучих N (або K). Цей розмір впливає на спектральні властивості, добротність бічних пелюсток і на стійкість до ефекту Доплера – тому при проектуванні мереж LTE вибирають оптимальне співвідношення між розміром ансамблю

і очікуваною рухливістю користувачів. У вузькому сенсі OFDM (як зазвичай реалізують: прямокутний часовий імпульс, $\alpha=0$) ансамбль реалізується як набір ортогональних Фур'є-функцій $f_k = k/TS$ і детектується Фур'є-аналізом (FFT).

4G (LTE) використовує надійну і просту схему – класичний CP-OFDM/DFT-s-OFDM, але вона має ряд обмежень, через які існує необхідність поліпшення ансамблю (тобто форми/складу піднесучих, обробку в часі/частоті і техніки попередньої обробки). Класичний CP-OFDM не оптимальний за PAPR, спектральною локалізацією, стійкістю до Доплеру і гнучкістю під нові сервіси. Покращення (зниження PAPR, фільтрація/занурення, нові мультикар'єрні схеми або OTFS) дають реальний виграш у спектральній та енергетичній ефективності, зменшенні перешкод, покращенні швидкості, надійності при рухливості та підтримці нових сервісів (низька затримка, IoT, URLLC тощо) – але платою за це стане збільшена складність, сумісність і вимоги до обчислень. Класична схема характеризується наступними параметрами:

- Високий PAPR (peak-to-average power ratio).

CP-OFDM дає пікові сплески амплітуди, що вимагає «лінійної» роботи підсилювача потужності (PA), знижуючи ККД і збільшуючи енергоспоживання та тепловиділення в базовій станції та в UE.

- Погана спектральна локалізація (високі ООВ-спотворення).

Прямокутне вікно формування в часі $\rightarrow$ сильні бічні пелюстки в частотній області. Це вимагає великих захисних смуг між сусідніми каналами/операторами і заважає гнучкому, асинхронному використанню спектру.

- Чутливість до частотних зсувів і Доплеру.

При великій швидкості руху (автомобілі, поїзди) виникають міжнесучі перешкоди (ICI), що погіршують BER/THP.

- Циклічний префікс та накладні витрати.

CP усуває міжсимвольну інтерференцію, але з'їдає частину часу символу – знижує спектральну ефективність.

- Обмежена гнучкість для нових сценаріїв.

Різноманітність вимог 5G/IoT/URLLC: дуже низька затримка, вузькосмугові пристрої з низьким енергоспоживанням, різноманітні нумерології, за рахунок чого класичний OFDM не є оптимальним для всіх.

- Складнощі при фрагментованому/агрегованому спектрі.

При агрегації несучих і роботі в нерівномірному спектрі потрібна краща локалізація за частотою.

Виділяються наступні методи покращення OFDM-ансамблю:

- SC-FDM/DFT-s-OFDM – зменшує PAPR (вже використовується в висхідному каналі LTE).
- Windowed-OFDM (W-OFDM) – згладжування країв у часі зменшує ООВ-виписки.
- Filtered/Subband-Filtered OFDM (UFMC, f-OFDM) – фільтрація піддіапазонів, поліпшена частотна локалізація без грубого переформатування всього сигналу.
- FBMC (Filter-Bank Multicarrier) – відмінна спектральна локалізація (практично відсутні бічні пелюстки), але складніше MIMO/символ-синхронізація.
- GFDM – гнучка структура з великою кількістю несучих, націлена на низьку затримку і асинхронність.
- OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) – значно покращує роботу в каналах з високим рівнем доплерівського зміщення.
- PAPR-мінімізація: SLM, PTS, тон-резервування і кодові схеми.
- Адаптивний CP/короткі символи – скорочують затримку в URLLC-сценаріях, але вимагають точної синхронізації.
- Windowing+Filtering+Advanced Channel Estimation – «м'який» шлях поліпшення з низькою зворотною сумісністю.

Для створення оптимальних умов роботи розглянутих стандартів необхідно враховувати вплив мобільності на радіоінтерфейс. У міру збільшення розміру OFDM-ансамблю відносна величина захисних інтервалів зменшується, що підвищує спектральну ефективність системи. Одночасно зростає тривалість OFDM-символу, що посилює вразливість до помилок частотної синхронізації та до ефектів Доплера. З цього випливає, що існує певний кінцевий, оптимальний розмір ансамблю (тобто оптимальна тривалість тактового інтервалу) для заданих швидкостей переміщення абонентів, несучої частоти і середнього SINR, при якому досягається найкраща продуктивність каналу.

У нашій статті буде використовуватись сигнальна конструкція з наступними позначеннями: N – розмір ансамблю піднесучих сигналу OFDM; G – виражений в тактах дискретизації захисний інтервал $\Delta t (\Delta t = 1/(N\Delta f))$; Δf – частотне рознесення піднесучих; F_0 – нижня частота робочого діапазону сигналу OFDM; T – тривалість такту сигналу OFDM ($T = (N+G)\Delta t$); L – номер такту, що містить корисний сигнал; i_0 – номер піднесучої, прийнятої в якості корисного сигналу.

На корисну компоненту (піднесуча i_0 на такті L) впливають перешкоди від сусідніх піднесучих того ж такту L , і залишкові вклади від піднесучих попереднього такту ($L-1$), що пройшли через захисний інтервал; впливом тактів раніше $L-1$ нехтуємо. Для такої моделі отримано аналітичні вирази рівнів корисного сигналу (P_S), міжсимвольної інтерференції (ISI) і сумарного рівня перешкод від інших піднесучих (ICI):

$$P_S = [I]^2 \left(N^2 \sum_{k=0}^G [h(k)]^2 + \sum_{k=G+1}^{N+G-1} (N+G-k)^2 [h(k)]^2 \right)$$

$$ISI = [I]^2 \sum_{k=G+1}^{N+G-1} (k-G)^2 [h(k)]^2$$

$$ICI = 2[I]^2 \sum_{k=G+1}^{N+G-1} (N+G-k)(k-G) [h(k)]^2$$

Де $[I]^2$ – середня енергія одного відліку виділеної піднесучої, $[h(k)]^2$ – середнє значення квадрата імпульсної характеристики каналу для затримки $k\Delta t$. При аналізі введено частотне відхилення при прийомі, що виникає як через нестабільність генераторного обладнання, так і в результаті ефекту Доплера. В результаті отримано модифіковані вирази для рівнів корисного сигналу, міжсимвольної інтерференції та сумарного рівню завад від інших піднесучих:

$$P_S = [I]^2 \left(\frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} \sum_{k=0}^G [h(k)]^2 + \sum_{k=G+1}^{N+G-1} \frac{\sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{N+G-k}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} [h(k)]^2 \right)$$

$$ISI = [I]^2 \sum_{k=G+1}^{N+G-1} \frac{\sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{k-G}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} [h(k)]^2$$

$$ICI = [I]^2 \left(\sum_{k=0}^G \left(N^2 - \frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} \right) [h(k)]^2 + \sum_{k=G+1}^{N+G-1} \left(N^2 - \frac{\sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{k-G}{N}\right) + \sin^2\left(\pi\varepsilon \frac{N+G-k}{N}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi\varepsilon}{N}\right)} \right) [h(k)]^2 \right)$$

Де $[I]^2$ – середня енергія одного відліку виділеної піднесучої, $[h(k)]^2$ – середнє значення квадрата імпульсної характеристики каналу для затримки $k\Delta t$, а $\varepsilon = \delta f / \Delta f$ – відносне частотне відхилення, виражене в кроках піднесучих Δf .

Проаналізовано режим автопідстроювання частоти на основі коригувальних зворотних сигналів (як у стільникових мережах, у тому числі LTE) і отримано оцінки для залишкової

частотної помилки ε . Ця помилка складається з короткочасної нестабільності генератору δ і подвоєної доплерівської складової:

$$2 \frac{v F_0 + \Delta f N / 2}{c \Delta f}$$

Де v – швидкість абонента в напрямку базової станції; c – швидкість світла.

Типові значення короткочасної нестабільності знаходяться в інтервалі 0,001-0,01 ppm (10.9-10.8), навіть при невеликих швидкостях абонента (близько 2 м/с) домінує доплерівський вплив. Внаслідок цього при аналізі оптимізації відносної помилки синхронізації доцільно використовувати вираз:

$$\varepsilon \approx 2 \frac{v F_0 + \Delta f N / 2}{c \Delta f}$$

Для відносної оцінки ефективності OFDM-сигналу пропонується показник, пов'язаний з теоретичною пропускну здатністю (формулою Шеннона), який може бути отриманий через вихідні співвідношення. Для цього показника введена наступна апроксимація:

$$\rho \approx \frac{1 + G/N_0 \log_2 \left(1 + \frac{1}{z_0} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{1}{z_0} - \frac{\sin^2(\pi \varepsilon N / N_0)}{(\pi \varepsilon N / N_0)^2} \right)}{1 + G/N \log_2 \left(1 + \frac{1}{z_0} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{1}{z_0} - \frac{\sin^2(\pi \varepsilon)}{(\pi \varepsilon)^2} \right)}$$

Де z_0 – SINR на виході кореляційного детектора при ідеальній частотній синхронізації; N_0 – опорний розмір ансамблю (в LTE зазвичай $N_0=1024$), відносно якого оцінюється ефективність. Множник $(1+G/N_0)/(1+G/N)$ відображає зміну відносної частки захисного інтервалу при переході від N_0 до N . Перехід $\varepsilon \rightarrow \varepsilon N / N_0$ враховує масштабування відносного частотного розладу при зміні числа піднесучих. Дослідження цього виразу дозволяє визначити оптимальні значення N , що забезпечують найкраще використання смуги для конкретних параметрів каналу і синхронізації.

На рис. 1 представлені узагальнені результати оцінок ефективності застосування ансамблів піднесучих різного розміру для OFDM-сигналів в мережах LTE 3 діапазону (1800 МГц) з урахуванням центру несучої $f_0=F_0+\Delta f N/2$. По горизонтальній осі представлено розмір ансамблю N , по вертикальній – швидкість переміщення абонента v в м/с. Значення критерію якості ρ , обчисленого за співвідношенням (4), нанесені у вигляді ліній постійного рівня (ізоліній або «геодезичних» перерізів), які показують, як змінюється ефективність при різних поєднаннях N і v . Крива з круговими маркерами – оптимальне узгодження між розміром ансамблю і швидкістю абонента, іншими словами, це безліч пар (N, v) , при яких показник ρ приймає оптимальні значення для заданих умов. Саме ця залежність служить практичним рішенням розглянутої задачі підбору оптимального розміру ансамблю піднесучих залежно від мобільності абонентів.

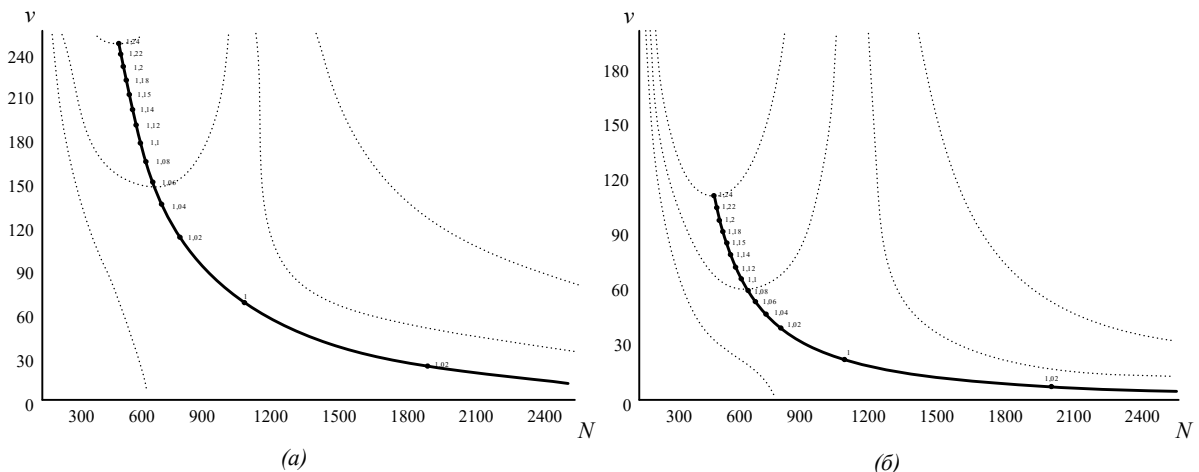


Рис. 1. Ефективність OFDM-ансамблю LTE Band 3: (а) $z_0 = 10$ дБ; (б) $z_0 = 25$ дБ

На рис. 1а і 1б показані результати для двох значень SINR $z_0=10$ і 25 дБ. На всіх зрізах функції якості ρ виділяється особлива точка, що відповідає опорному ансамблю N_0 при рівні $\rho=1$. Звертаючись до рис. 2б, видно, що при $z_0 = 25$ дБ (одному з типових рівнів) структура сигналів LTE в діапазоні 1800 МГц оптимально узгоджується зі швидкостями абонентів порядку 20 м/с. Зі збільшенням SINR оптимальні швидкості знижуються, а виграш від зменшення розміру ансамблю стає помітнішим. На рис. 2 представлені аналогічні оцінки для мережі LTE 7 діапазону (2600 МГц): підвищення робочої частоти призводить до різкого зниження розрахункової швидкості, для якої мережа найкращим чином узгоджена. При $z_0=25$ дБ оптимальна швидкість виявляється близько $v = 7$ м/с; рухи зі швидкістю вище 35 м/с призводять до втрат близько 22% і більше.

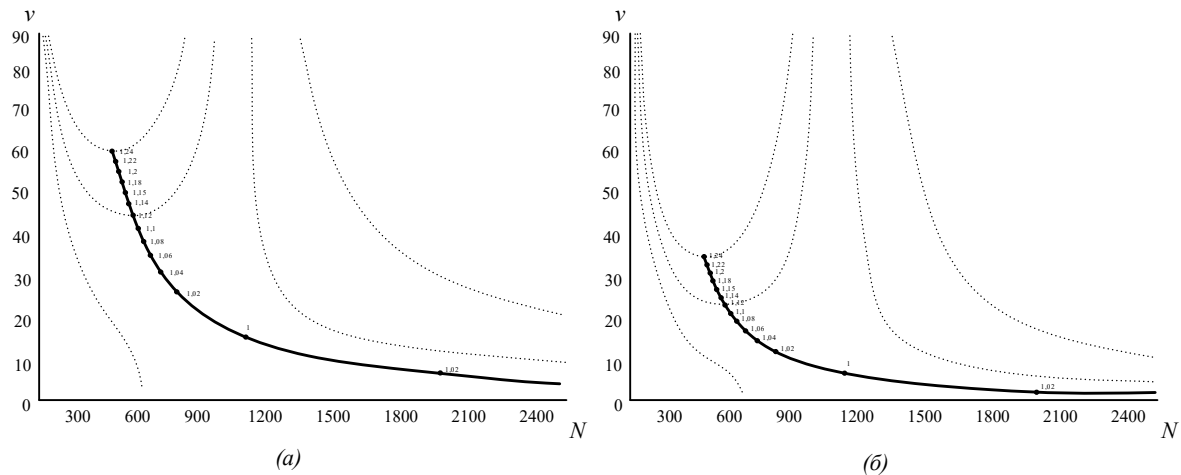


Рис. 2. Ефективність OFDM-ансамблю LTE Band 7: (а) $z_0 = 10$ дБ; (б) $z_0 = 25$ дБ

Динаміка переміщень абонентів має помітний вплив на пропускну здатність каналу і цей ефект навряд чи обмежиться лише розглянутими метриками. Отже, доцільно продовжити дослідження і визначити, які зміни потрібні для ключових алгоритмів, зокрема для оптимального управління кількістю каналів у режимі МІМО, правил оптимального розподілу ресурсів між абонентами; для адаптивних алгоритмів просторової селекції та пеленгації напрямків, а також для алгоритмів синхронного кодового поділу, виведених при квазістаціонарних припущеннях. Такі дослідження дозволять сформулювати відповідні модифікації алгоритмів і оцінити їх вплив в умовах рухливості.

Розмір ансамблю OFDM, застосований в LTE для діапазону 2600 МГц, виявляється надмірно великим: при високих швидкостях руху (понад 110 км/год) це призводить до помітної деградації продуктивності каналу (понад 20%), що особливо критично для сервісів з високоранговою модуляцією (наприклад, QAM64). Оцінки для діапазону 1800 МГц дають схожі результати: більше частотне рознесення піднесучих в LTE зменшує чутливість до доплерівських зсувів, проте одночасно збільшує відносну частку захисного інтервалу по відношенню до тривалості OFDM-символу, що знижує ефективність використання ресурсу. У підсумку зазначені протилежні ефекти значною мірою взаємно компенсують один одного.

Висновки

У статті показано, що розмір OFDM-ансамблю N є критичним параметром, який визначає компроміс між спектральною ефективністю та стійкістю до частотних помилок і доплерівських зсувів. Виведені аналітичні вирази для рівнів корисного сигналу, ISI та ICI дозволяють формалізувати цей компроміс і ввести критерій якості ρ , що дає можливість обрати оптимальне N для заданих умов (несуча частота, швидкість абонента, SINR, величина CP). Чисельні оцінки для типових параметрів LTE показують конкретні наслідки цього компромісу: для $f_0 \approx 1800$ МГц при $z_0 \approx 25$ дБ оптимальне узгодження ансамблю відповідає швидкостям порядку 20 м/с, тоді як для $f_0 \approx 2600$ МГц оптимальна швидкість знижується до 7

м/с; при рухах вище 35 м/с спостерігається значна деградація (порядку $\geq 20\text{--}22\%$) продуктивності каналу при типовому N (наприклад, $N_0=1024$).

Список використаних джерел:

1. Mohammed S.K., Prakash S., Ubadah M., Ali K.I., Hadani R., Rakib S., Kons S., Hebron Y., Chockalingam A., Calderbank R. Zak-OFDM: Low Complexity Joint Equalization of OFDM Carriers in Doubly-Spread Channels. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.23045>.
2. Ma Y., Ai B., Yuan J., Li S., Cheng Q., Shi Z., Yuan W., Wei Z., Shafie A., Ma G., Lu Y., Yang M., Zhong Z. Delay-Doppler Domain Signal Processing Aided OFDM (DD-a-OFDM) for 6G and Beyond. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.04253>.
3. Fine carrier frequency offset estimation for OFDM and MIMO-OFDM systems: A comparative study / M. M. E. Kotb et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98233-3>.
4. Hander A., Erkal B., Rahebi J. Symbol Classification in Receiver of OFDM Carrier Signal with Deep Learning and Whale Optimization Algorithm. *Politeknik Dergisi*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.2339/politeknik.1664072>.
5. Experimental review of wideband OFDM in electronic sub-mmW wireless communication / S. Haussmann et al. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2025. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1017/s1759078725102365>.
6. Cho J. H., Lee J. H. OFDM-Based Carrier Phase Localization with Integer Ambiguity Resolution. *IEEE Access*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3585495>.
7. Nagaraj S., Sarkar M. Inter-Carrier Interference Reduction Technique for Backscattered OFDM. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2024.3381868>.
8. Joint Optimization and Performance Analysis of Analog Shannon–Kotel’nikov Mapping for OFDM with Carrier Frequency Offset / J. Lin et al. *Entropy*. 2025. Vol. 27, no. 8. P. 778. URL: <https://doi.org/10.3390/e27080778>.

Автори статті

Кравченко Владислав – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-4758-7027

Борисенко Ірина – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0001-8582-3126

Голубенко Олександр – кандидат технічних наук, доцент, Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-1776-5160

Яковець Всеволод – аспірант, старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0002-3866-8017

Хаб'юк Наталія – старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0005-7917-5528

Authors of the article

Kravchenko Vladyslav – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-4758-7027

Borysenko Iryna – Candidate of Sciences (technical), State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0001-8582-3126

Golubenko Oleksandr – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Academician Yuriy Bugay International Scientific and Technical University, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-1776-5160

Yakovets Vsevolod – postgraduate, senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0002-3866-8017

Khabyuk Nataliia – senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0005-7917-5528