

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ІНДЕКСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ПІДНЕСУЧИХ OFDM ДЛЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНИХ КАНАЛІВ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

*У статті обґрунтовано вибір варіанту упаковки біт, групування піднесучих, оптимального розміру субблоку та кількості активних піднесучих, об'єму модуляційного ансамблю сигналів для методу ортогонально-частотно-індексної модуляції OFDM-IM.*

*Проведений аналіз показав, що однією з основних задач сучасних військових систем безпроводового зв'язку є якісна реалізація об'ємних інформаційних мультимедійних додатків. Забезпечення високих показників надійності та швидкості передачі інформації в реальних безпроводових каналах зв'язку ускладнюється через частотно-селективні завмирання і доплерівський зсув частот. Перспективним засобом боротьби з міжсимвольною інтерференцією, викликаною частотною селективністю багатопроменевого каналу, є технологія ортогонального ущільнення з частотним розподілом OFDM. Забезпечуючи достатньо високий ступінь використання каналу за смугою частот, OFDM потребує удосконалення в частині підвищення енергетичної та подальшого зростання спектральної ефективності. Введення додаткових вимірів передачі в рамках широкого класу схем з індексною модуляцією IM дозволяє одночасно підвищити спектральну та енергетичну ефективність системи передачі. Метод OFDM-IM є більш завадостійким порівняно з класичним OFDM. Крім значного енергетичного виграшу завдяки індексуванню піднесучих OFDM, метод також дозволяє отримати виграш і за показниками спектральної ефективності.*

*У результаті проведених досліджень розроблено рекомендації для підвищення ефективності схеми OFDM-IM: в якості варіанту упаковки біт слід застосовувати таблиці відповідності з розміром субблоку  $n \leq 8$  та ансамблями сигналів невеликого об'єму  $M = 2, 4$ , оскільки при  $M = n \geq 16$  завадостійкість методу OFDM-IM знижується, а виграш за показниками спектральної ефективності зникає.*

*Ключові слова: індексна модуляція, оптимізація, мультиплексування з ортогональним частотним розподілом каналів, завадостійкість, спектральна ефективність.*

**Вступ та постановка задачі в загальному вигляді.** Сучасні військові системи безпроводового зв'язку (СБЗ) повинні забезпечувати високі показники завадостійкості та швидкості передачі засекреченої інформації, в тому числі і якісну реалізацію об'ємних інформаційних мультимедійних додатків. Усе це вимагає підвищення інформаційної ефективності СБЗ шляхом наближення пропускнуєї спроможності каналів безпроводового зв'язку до теоретичних меж. В умовах обмеженості частотно-енергетичного та просторового ресурсів високоефективне використання реальних безпроводових каналів суттєво ускладнюється через частотно-селективні завмирання (*frequency-selective fading*) та фазову нестаціонарність сигналів, викликану мобільністю абонентських пристроїв, а також динамічним переміщенням пунктів та органів військового управління.

Протягом останнього десятиліття використання багаточастотної передачі стало ключовою технологією для забезпечення високошвидкісного широкосмугового доступу та мобільного зв'язку в реальних каналах з частотною селективністю. Ортогональне частотне мультиплексування (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*) характеризується підвищеною стійкістю до багатопроменевого поширення сигналу та забезпечує низький рівень міжсимвольної інтерференції (*Inter-Symbol Interference, ISI*) завдяки перетворенню широкосмугового частотно-селективного каналу в множину вузькосмугових підканалів з амплітудними завмираннями. Використання багатопозиційних сигналів фазової (*Phase Shift Keying, M-PSK*) або квадратурно-амплітудної модуляції (*Quadrature Amplitude Modulation, M-QAM*) кожної піднесучої забезпечує високу спектральну ефективність (СЕ) систем з OFDM ( $M$  – розмір ансамблю сигналів,  $M = 2, 4, 8, 16, 64, \dots$ ). Такий метод модуляції з багатьма піднесучими розглядається як достатньо конкуруюча альтернатива при розробці мереж мобільного зв'язку нового покоління 5G і вже став невід'ємною частиною практично всіх

стандартів безпроводового зв'язку та цифрового телебачення: *LTE*, *WiMAX IEEE 802.16*, *WiFi IEEE 802.11n* та *DVB* [1, 2]. У той же час, технологія *OFDM* є чутливою до фазової нестаціонарності сигналу, оскільки через порушення ортогональності піднесучих внаслідок доплерівського зсуву частот та інших випадкових фазових флуктуацій виникає міжканальна інтерференція (*Inter-Channel Interference, ICI*). Крім того, *OFDM* має високе відношення пікової до середньої потужності радіосигналу (*Peak to Average Power Ratio – PAPR*).

Забезпечуючи достатньо високий ступінь використання каналу за смугою частот (СЕ), *OFDM* потребує удосконалення в частині підвищення енергетичної ефективності (ЕЕ) та подальшого зростання СЕ. Для класу релєвських частотно-селективних каналів найбільш привабливим є метод індексної частотної модуляції піднесучих *OFDM*, що дозволяє одночасно підвищити надійність та швидкість передачі інформації за рахунок введення додаткового частотного виміру.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод індексної частотної модуляції піднесучих *OFDM-IM* [3] належить до широкого класу схем з індексною модуляцією (*Index Modulation, IM*) [4, 5], в яких реалізація неявного інформаційно-керованого механізму перемикавання стану активності допоміжних блоків передачі дозволяє до них приєднувати певну частину загального потоку біт. Принцип роботи схеми модуляції з додатковим частотним виміром полягає в передачі інформації не тільки за рахунок комплексних *M-PSK/QAM*-символів, а й індексами активних піднесучих, які активуються в залежності від вхідного потоку інформаційних біт [6]. У порівнянні з класичною *OFDM*, її індексний варіант є більш завадостійким для СЕ 1 – 4 біт/с/Гц [3]. Підвищення СЕ в *OFDM-IM* досягається додатковими індексними бітами, отриманими завдяки наборам активації піднесучих. Основна відмінність схеми *OFDM-IM* порівняно зі звичайною *OFDM* полягає в тому, що у фреймах *OFDM* присутні нульові елементи, позиції яких також несуть інформацію. Деактивація частини піднесучих одночасно дозволяє також зменшити *PAPR* та *ICI*.

Протягом кількох останніх років концепція індексної модуляції піднесучих *OFDM* (*Subcarrier Index Modulation, SIM*) привернула значну увагу дослідників у галузі телекомунікацій [7, 8]. Удосконалений алгоритм визначення активності піднесучих для схем *OFDM* з *SIM* наведено в [9]. Кілька форм узагальнення *OFDM-IM* зі збільшеною кількістю наборів активації піднесучих та індексуванням синфазної та квадратурної складових піднесучих запропоновано в [10, 11]. У [12] проаналізовано завадостійкість *OFDM-IM* з координатним переміщенням та отриманий додатковий енергетичний вигравш (ЕВ) від рознесення піднесучих (*Coordinate Interleaving OFDM-IM, CI-OFDM-IM*). У [13] метод *OFDM-IM* адаптовано для функціонування «розумних» самокерованих транспортних засобів за технологією (*Vehicle-to-Infrastructure, V2X*). Окремим випадком *OFDM-IM* є схема *OFDM-IM-WSAO* (*With Subcarrier Activation Only*), в якій передача інформації здійснюється лише активацією піднесучих, без *PSK/QAM*-модуляції [3]. У [14] та [15] досліджено проблему вибору оптимальної кількості активних піднесучих, проте це завдання є лише частковим вирішенням завдання структурно-параметричної оптимізації методу *OFDM-IM*.

**Метою даної статті** є обґрунтування вибору методу упаковки біт, групування піднесучих, оптимального розміру субблоку та кількості активних піднесучих, об'єму модуляційного ансамблю сигналів для методу ортогонально-частотно-індексної модуляції.

**Викладення основного матеріалу.** Принцип роботи індексної модуляції піднесучих *OFDM* та призначення кожного блоку детально описано в [3, 16]. Структурна схема *OFDM-IM* зображена на рис. 1.

Спектральна ефективність методу *OFDM-IM*:

$$\beta = \frac{m}{N+L} = \frac{pG}{N+L} = \frac{(p_1 + p_2)G}{N+L}, \quad (1)$$

де  $m$  – загальна кількість інформаційних біт,  $N$  – загальна кількість піднесучих в *OFDM* (розмір вікна зворотнього / швидкого перетворення Фур'є З/ШПФ, *Inverse / Fast Fourier*

Transformation, I / FFT),  $L$  – довжина циклічного префіксу  $CP$  (Cyclic Prefix),  $G$  – кількість субблоків (груп по  $p$  біт).

Перших  $p_1$  біт визначаються за формулою:

$$p_1 = \left\lfloor \log_2 C \binom{n}{k} \right\rfloor, \quad (2)$$

де  $n$  – довжина субблоку (кількість доступних піднесучих  $OFDM$  в кожному субблоці),  $k$  – кількість активних піднесучих в субблоці,  $C \binom{n}{k}$  – можливі комбінації активності,  $1 \leq k < n$ ,

$\lfloor x \rfloor$  – найбільше ціле  $n \leq x$ . Решта  $p_2$  біт упаковується з символами ансамблю сигналів, що модулюють  $k$  піднесучих з активними індексами:

$$p_2 = k \log_2 M. \quad (3)$$

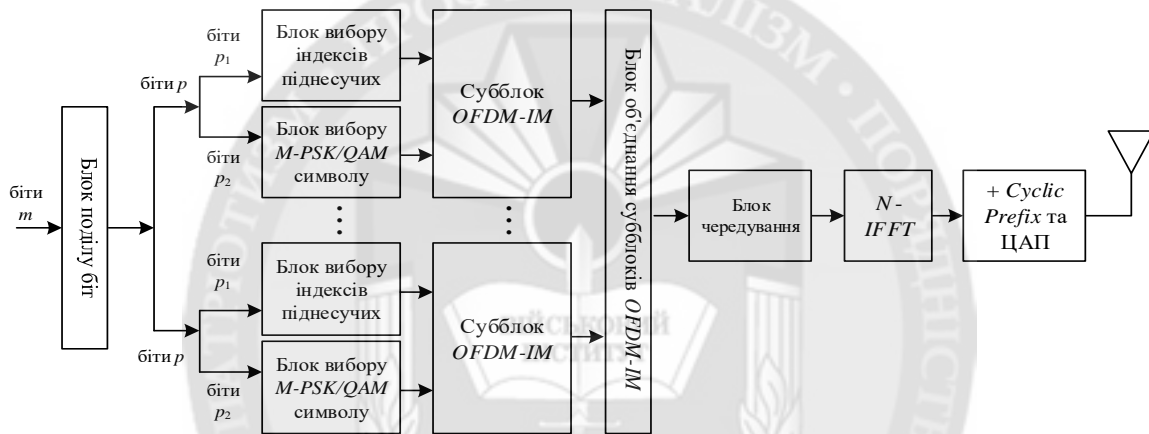


Рисунок 1 – Структурна схема  $OFDM-IM$

Слід зауважити, що при  $k = n$  (активовано всі піднесучі) класична  $OFDM$  стає ще одним частковим випадком  $OFDM-IM$ . Через те, що у схемі  $OFDM-IM$  символи, що передаються на неактивних піднесучих дорівнюють нулю (інформація на них не передається), втрата загальної кількості переданих даних компенсується передачею додаткових біт в індексному домені блоку  $OFDM$ .

Кількість переданих субблоків визначається так:

$$G = \frac{N}{n}. \quad (4)$$

Поділ загального потоку  $m$  біт на групи є важливим, оскільки при  $G = 1$ ,  $n = N$  визначення можливих комбінацій активації піднесучих стає складною або майже невирішеною задачею, оскільки в сучасних стандартах безпроводового зв'язку вікно ШПФ може приймати дуже великі значення:  $N = 256, 512, 1024, 2048 \dots$  Тому для реалізації  $OFDM-IM$ , одиночний та масивний блок має бути поділений на  $G$  менших та операбельних субблоків, кожен з яких містить  $n$  піднесучих. Це дозволяє спростити процедуру вибору індексів на передачі та процес детектування на приймальній стороні. Типовими значеннями  $N$  є цілі степені двійки:  $2^f$ ,  $f = 1, 2, \dots, 11$ . Довжина  $CP$  повинна бути більшою, ніж коефіцієнт розсіювання (багатопронемовості). Зазвичай, в залежності від якості каналу,  $L = 1/4, 1/8, 1/16$

або  $1/32$  від тривалості *OFDM*-фрейму.

### **Застосування різних методів упаковки біт та відповідних їм типів детекторів**

Процедура вибору  $k$  активних піднесучих з  $n$  доступних у субблоці реалізується за двома різними принципами [3]:

#### **1. На основі таблиць відповідності.**

Таблиці відповідності – дуже ефективний та простий метод упаковки біт, проте його неможливо застосувати при великих значеннях  $n$  і  $k$ , оскільки розмір таблиці  $C$  стає надвеликим, і її неможливо обробити, зберегти, оперувати нею через недостатню швидкодію цифрових процесорів обробки сигналів (ЦПОС), малий об'єм пам'яті оперативних (ОЗП) чи постійних запам'ятовуючих пристроїв (ПЗП). Створення таблиць відповідності, їх збереження та звернення до них у процесі передачі інформації можливе при  $n \leq 8$  [3].

Перевагою цього методу упаковки біт є можливість застосування детектора максимальної правдоподібності *ML* (*Maximum Likelihood Detection*), оскільки таблиця відповідності відома на приймальній стороні. Детектор *ML* формує оцінки всіх варіантів реалізації субблоків для всіх можливих комбінацій індексів піднесучих *OFDM* та переданих символів ансамблю сигналів на кожній піднесучій. Складність такого детектора зростає експоненційно, тому його застосування стає неможливим при великих значеннях  $n$  та  $k$ . Для спрощеної реалізації схеми з *OFDM-IM* можливе застосування субоптимального *ML* детектора. Експоненційну складність декодування класичного *ML* детектора можна зменшити завдяки використанню спеціального детектора логарифмічної правдоподібності *LLR* (*Log-Likelihood Detector*) сумісно з таблицями відповідності. Спрощений *ML* детектор обчислює відповідні *LLR* суми для кожної можливої комбінації індексів із заздалегідь складеної таблиці відповідності, а потім визначає найбільш схожу комбінацію.

#### **2. Метод комбінаторики.**

Цей варіант упаковки біт застосовується при  $n \geq 16$  [3]. Для великих значень  $C$  та застосуванні комбінаторного методу упаковки біт використовуються виключно субоптимальні методи детектування, детально описані та проаналізовані в [3]. Слід зазначити, що застосування *LLR* детектора без таблиць відповідності може привести до збою, оскільки приймач не здатний визначити активні індекси, якщо вони не використовувались передавачем.

Відомо, що із загальної кількості можливих комбінацій активації піднесучих  $C \binom{n}{k}$  використовується лише  $2^{P_1}$  наборів.

Незважаючи на те, що спрощений *ML* та *LLR* детектори належать до класу субоптимальних, їх ефективність може бути дуже близькою до детектування за принципом максимальної правдоподібності [3]. Складність детектора *LLR* не відрізняється від складності класичного *OFDM* детектора.

### **Перемішування груп піднесучих**

Дослідження [6] показали, що декореляція піднесучих у блоках та чередування блоків відіграє ключову роль для наближення до пропускнуєї спроможності каналу, оскільки канальні коефіцієнти для кожної піднесучої у такому випадку є статистично незалежними при будь-якому *SNR* для *PSK/QAM*-модуляції. Для класичної *OFDM* перемішування практично не впливає на ефективність системи; у той же час, *OFDM-IM* з локалізованою компоновкою програє перемішаній до 3 дБ.

Блок чередування у схемі *OFDM-IM* забезпечує перемішане розміщення груп піднесучих. При відсутності цього блоку групування буде локалізованим, що призведе до зниження максимальної швидкості передачі інформації. Слід зауважити, що вид групування піднесучих відомий і передавачу, і приймачу. Відмінності перемішаної та локалізованої (звичайної) компоновки зображено на рис. 2, а їх ефективність проаналізовано в [6].

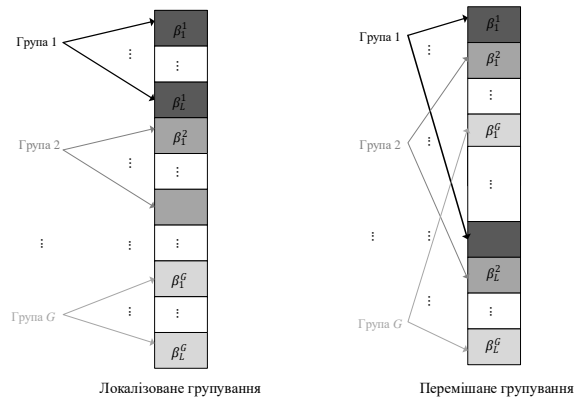


Рисунок 2 – Принципи перемішаного та локалізованого групування [6]

**Вибір оптимального розміру субблоку, об'єму ансамблю сигналів та оптимальної кількості активних піднесучих у субблоці схеми OFDM-IM**

Результати теоретичних досліджень та імітаційного моделювання [6] показують, що для досягнення максимальних показників швидкості передачі інформації при великих  $SNR > 20$  дБ у схемі з індексною модуляцією піднесучих доцільно активувати  $k = n - 1$  піднесучих. При середніх  $10 < SNR < 20$  дБ слід обирати неактивними пару піднесучих, тоді  $k = n - 2$ . У випадку активації невеликої кількості піднесучих, ентропія є надто малою, тому схема з OFDM-IM програє класичній схемі OFDM за показниками СЕ. Також класична OFDM показує кращу завадостійкість при  $SNR < 10$  дБ, оскільки у складній завадовій обстановці помилки виникають і при детектуванні індексів, і при декодуванні символів комплексного ансамблю сигналів.

При дослідженні поведінки індексної та класичної схем OFDM (без CP), за умови що  $n = 2, k = 1, BPSK$  та  $n = 4, k = 3, QPSK$  схеми OFDM-IM та OFDM мають однакову СЕ (1 та 2 біт/с/Гц, відповідно). При цьому, в разі перемішаного групування, вираш від використання IM складає 3 та 2 дБ, відповідно, що є важливим фактором для мобільних абонентів з обмеженим енергетичним ресурсом. Така поведінка є очікуваною, оскільки при максимальній незалежності каналів, розрізнити набори активації піднесучих стає простіше.

Унікальною є комбінація  $n = 8, k = 3, BPSK$ , при якій OFDM-IM та OFDM мають однакову СЕ 1 біт/с/Гц. При цьому, енергетичний вираш завдяки індексній модуляції  $EB_{IM}$  в OFDM-IM складає 5 дБ для  $P_{пом} < 10^{-4}$ . При  $n = 8, k = 3$  неможливо здійснити обмін  $EB_{IM}$  на підвищення СЕ на 1 біт/с/Гц шляхом збільшення розміру ансамблю сигналу до QPSK, оскільки набір  $n = 8, k = 3, QPSK$  є неоптимальним та призведе до втрати 31% СЕ порівняно з класичною OFDM, QPSK (СЕ = 2 біт/с/Гц). При  $k = 4, 5, 6, 7, BPSK$ , метод OFDM-IM, крім  $EB_{IM}$ , також дає вираш за показником СЕ на 0,25 біт/с/Гц, порівняно з класичною OFDM. Очевидно, що активувати половину піднесучих у субблоці ( $k = n / 2 = 4$ ) ефективніше, ніж активувати  $k = 5 - 7$  піднесучих для досягнення однакової СЕ, з міркувань завадостійкості, а також для зменшення пік-фактора PAPR.

Також, слід розглянути цікаві випадки:

1)  $n = 8, k = 7, QPSK$ , при якому метод OFDM-IM переважає класичну OFDM за показниками СЕ на 0,125 біт/с/Гц.

2)  $n = 16, QPSK$ , при якому СЕ методу OFDM-IM не відрізняється від СЕ класичної OFDM, при  $k = 10$  та  $14$ , та дорівнює 2 біт/с/Гц. При  $k = 11, 12$  та  $15$  має місце вираш за СЕ 0,125 біт/с/Гц завдяки IM. При  $k = 13$  є вираш за СЕ 0,1875 біт/с/Гц.

3)  $n = 16, k = 15, 16-QAM$ , при якому СЕ OFDM-IM не відрізняється від СЕ класичної OFDM, та дорівнює 4 біт/с/Гц. При цьому, за умов хорошої енергетики каналу, також доцільніше активувати  $k = n - 1$  піднесучих (не всі, тобто IM) та отримати  $EB_{IM}$  1 дБ.

Для більших розмірів ансамблю сигналів ( $\geq 64-QAM$ ) та субблоків ( $n > 16$ ) спостерігається втрата ефективності OFDM-IM зі зменшенням вирашу від застосування IM:

- втрачається можливість застосовувати таблиці відповідності на передачі (є необхідність використання законів комбінаторики);

- неможливе застосування детектора максимальної правдоподібності, оскільки немає зразків з таблиць відповідності для порівняння, а відсоток невикористовуваних наборів активації надто великий;

- класична *OFDM* переважає *OFDM-IM* за СЕ, оскільки активуються не всі піднесучі:  $k < n$ , і все більшої ваги в загальну СЕ вносить саме розмір ансамблю сигналів, а не індексний домен.

Ще одним підтвердженням недоцільності використання субблоків великого розміру є наступний приклад. Для 16-QAM,  $n = 16$ ,  $k = 15$ , СЕ = 4 біт/с/Гц. Для 16-QAM,  $n = 32$ ,  $k = 16$  СЕ = 2,91 біт/с/Гц (втрата 27% СЕ у порівнянні з класичною *OFDM*). Якщо ж, враховуючи рекомендації, обрати  $k = n - 1 = 31$ , отримаємо СЕ = 4,03 біт/с/Гц, що складає виграш 0,75% за показником СЕ. При цьому, для 16-QAM втрата СЕ схеми *OFDM-IM* з  $n = 32$ ,  $k = 31$  (детектування 5 (п'яти) індексних біт комбінацій активованих піднесучих *OFDM*) порівняно з  $n = 16$ ,  $k = 15$  (детектування 4 (чотирьох) індексних біт) значно перевищить незначний виграш за СЕ першої схеми.

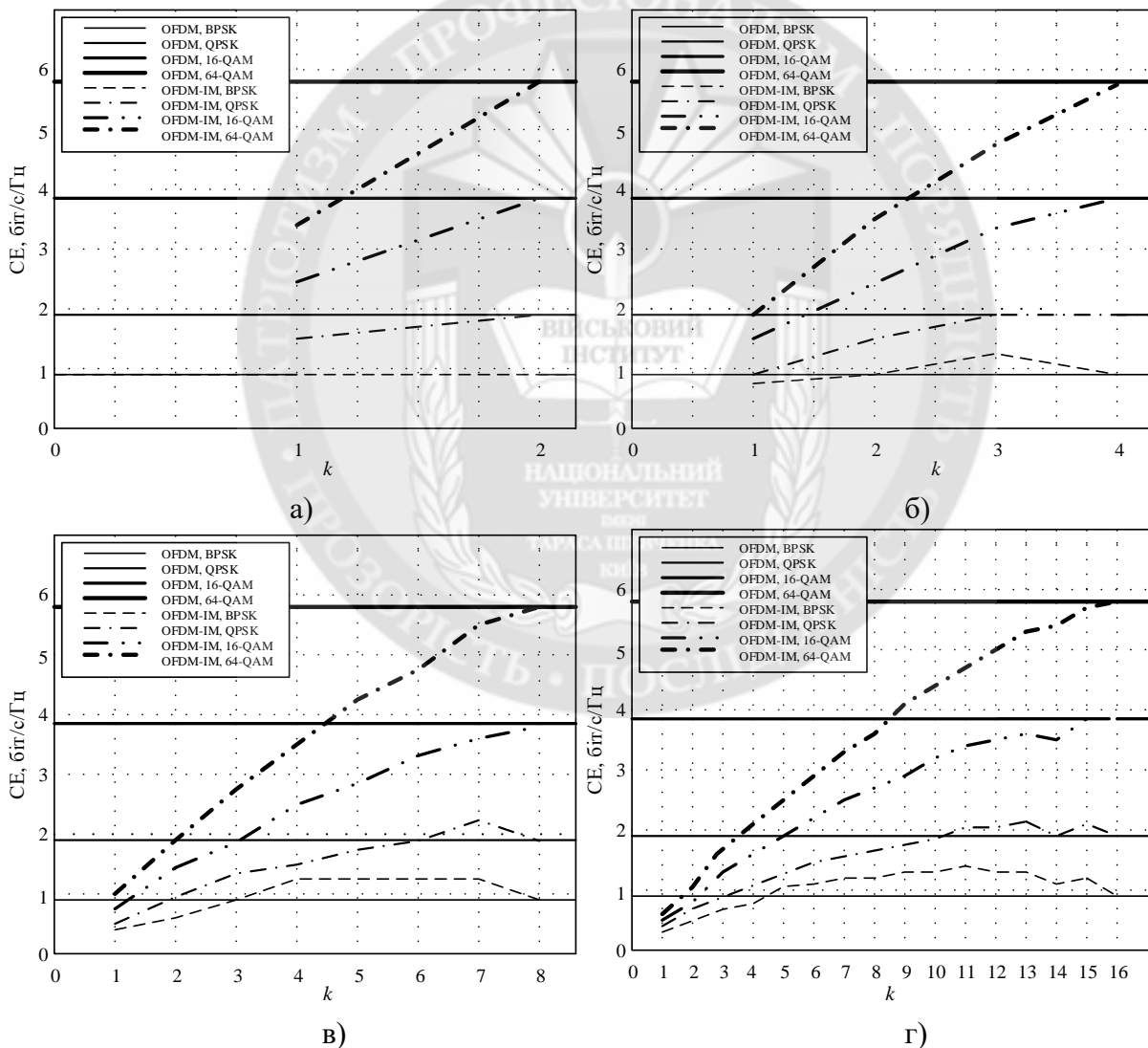


Рисунок 3 – Порівняння спектральної ефективності *OFDM-IM* та класичної *OFDM* для різних ансамблів сигналів та кількості активних піднесучих  $k$ , при  $N = 1024$ , а)  $n = 2$ ; б)  $n = 4$ ; в)  $n = 8$ ; г)  $n = 16$ . Втрата 4% СЕ на графіках пов'язана з наявністю захисного інтервалу  $CP = 32$

Очевидно, що втрату СЕ (рис. 3, (а-г)) через виключення декількох піднесучих з процесу передачі інформації при використанні багатопозиційних ансамблів сигналів не завжди можна компенсувати кількістю індексних біт активації піднесучих *OFDM*. Схема *OFDM-IM* із *M-QAM*,  $M \geq 16$ ,  $k < n$  взагалі не досягає СЕ класичної *OFDM* для будь-яких комбінацій  $(n, k)$ , за винятком розглянутого вище виняткового випадку  $n = 32$ ,  $k = 31$ , 16-*QAM*. При  $n = 4, 8, 16$  вигреш у СЕ (до 0,44 біт/с/Гц) спостерігається лише при застосуванні *BPSK*. Зауважимо, що при *BPSK* приріст СЕ 0,4375 біт/с/Гц досягається при  $n = 16$ ,  $k = 11$ . Однак при цьому із-за великої кількості можливих комбінацій (4368), виникає необхідність застосування комбінаторного методу активації піднесучих та субоптимального детектування, що означає значну втрату ЕЕ. При  $n = 8, 16$  вигреш у СЕ (0,125 біт/с/Гц) є при застосуванні *QPSK*.

У деяких випадках, застосування *OFDM-IM* є енергетично ефективнішим у порівнянні з класичною *OFDM*.  $ЕВ_{IM}$ , отриманий для різних ансамблів сигналів та комбінацій  $(n, k)$ , не підлягає обміну на підвищення СЕ за рахунок переходу на вищий формат модуляції. Спроба такого обміну призведе до втрати СЕ, оскільки для кожного ансамблю сигналів оптимальні комбінації  $(n, k)$  не співпадають.

Результати власних досліджень та виснажливих пошуків оптимального розміру субблоку, об'єму ансамблю сигналів та кількості активних піднесучих у субблоці схеми *OFDM-IM* показали, що для кожного *M-PSK, QAM* є кілька наборів  $(n, k)$ , що дають вигреш за СЕ та / або  $ЕВ_{IM}$ . Такі набори з їх перевагами наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Оптимальні комбінації *OFDM-IM* з отриманим енергетичним вигрешем та /або вигрешем за показниками спектральної ефективності для різних розмірів ансамблів сигналів

Ансамбль сигналів	Комбінації <i>OFDM-IM</i>	Вигреш за СЕ, порівняно з класичною <i>OFDM</i> , біт/с/Гц	$ЕВ_{IM}$ , порівняно з класичною <i>OFDM</i> , дБ
<i>BPSK</i>	$n = 2, k = 1$	0	2,2
	$n = 4, k = 2$	0	6
	$n = 4, k = 3$	0,25	4,9
	$n = 8, k = 4$	0,25	3,8
<i>QPSK</i>	$n = 4, k = 3$	0	2
	$n = 8, k = 7$	0,125	1,7
16- <i>QAM</i>	$n = 16, k = 15$	0	0,8

Слід зазначити, що класична *OFDM* не є гнучкою з погляду СЕ та неспроможна забезпечити СЕ 1,25 чи 2,125 біт/с/Гц, на відміну *OFDM-IM*, тому отриманий  $ЕВ_{IM}$  оцінювався із погляду забезпечення приблизно рівних СЕ схем, що порівнюються.

**Висновки.** Таким чином, метод ортогонально-частотно-індексної модуляції *OFDM-IM* дозволяє здійснити надійну передачу інформації в безпроводових каналах зв'язку з частотно-селективними завмираннями та є більш завадостійким порівняно з класичною *OFDM*. Крім значного енергетичного вигрешу завдяки індексуванню піднесучих *OFDM*, метод одночасно дозволяє отримати вигреш і за показниками спектральної ефективності. Для цього слід виключити з передачі одну-дві (у виняткових випадках – чотири) піднесучих  $k$  із загальної кількості в субблоці  $n$ .

З урахуванням можливостей сучасних цифрових процесорів обробки сигналів, в якості методу упаковки біт слід застосовувати таблиці відповідності з розміром субблоку  $n \leq 8$  та ансамблями сигналів *BPSK (QPSK)*, оскільки при  $M = n \geq 16$  завадостійкість методу *OFDM-IM* знижується, а вигреш у СЕ зникає.

У разі необхідності забезпечити високі показники СЕ (більше 4 біт/с/Гц) слід застосовувати багатоантенні системи в режимі мультиплексування (неортогональне просторово-часове кодування) в рамках різних варіантів схем *MIMO-OFDM-IM* [16-20]. У складній завадовій обстановці для отримання СЕ до 4 біт/с/Гц слід поєднати методи

ортогонального просторово-часового кодування та ортогонально-частотно-індексної модуляції.

**Перспективним напрямком подальших досліджень** є розробка методу просторово-часового блочного кодування з індексною модуляцією піднесучих *OFDM* для частотно-селективних та нестационарних каналів безпроводового зв'язку в рамках єдиної сигнально-кодової конструкції *STBC-OFDM-IM*.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Hanzo L., Akhtman Y.(J.), Wang L., Jiang M. MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMax. Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo-transceivers. – UK: J.W.S. 2011. – 658 с.
2. ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004-06) Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.
3. Basar E., Aygolu U., Erdal P., Poor V. Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation. IEEE transactions on signal processing. 2013.
4. Basar E., Wen M., Mesleh R., Renzo M., Xiao Y., Haas H. Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks. Special section on index modulation techniques for next-generation wireless networks. IEEE Access, vol. 5, pp. 16693 – 16746, 2017.
5. Cheng X., Zhang M., Wen M., Yang L. Index Modulation for 5G: Striving to Do More with Less. IEEE Wireless Communications, vol. 25, issue 2, pp. 126 - 132, April 2018.
6. Wen M., Cheng X., Ma M., Jiao B., Poor V. On the achievable rate of OFDM with index modulation. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 64, no. 8, pp. 1919-1932, Apr. 2016.
7. Abu-alhiga R., Haas H. Subcarrier-index modulation OFDM. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Communications. (PIMRC), Tokyo, Japan, Sep. 2009, pp. 177–181.
8. Tsonev D., Sinanovic S., Haas H. Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM. IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM), Houston, USA, Dec. 2011, pp. 728–732.
9. He Q., Schmeink A. A Better Decision Rule for OFDM with Subcarrier Index Modulation. WSA 2017; 21th International ITG Workshop on Smart Antennas.
10. Fan R., Yu Y.J., Guan Y.L. Generalization of orthogonal frequency division multiplexing with index modulation. IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 10, pp. 5350-5359, Oct. 2015.
11. Deepika M.J., Subhas C. Generalized Schemes of Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), volume 3, issue 9, Sep. 2016.
12. Basar E. OFDM with index modulation using coordinate interleaving. IEEE Wireless Communications Letter, vol. 4, no. 4, pp. 381–384, Aug. 2015.
13. Cheng X., Wen M., Yang L., Li Y. Index modulated OFDM with interleaved grouping for V2X communications. IEEE Int. Conf. Intellig. Transportation Systems, Oct. 2014, pp. 1097–1104.
14. Wen M., Cheng X., Yang L. Optimizing the energy efficiency of OFDM with index modulation. IEEE Int. Conf. Communications Systems, Nov. 2014, pp. 31–35.
15. Li W., Zhao H., Zhang C., Zhao L., Wang R. Generalized selecting sub-carrier modulation scheme in OFDM system. IEEE Int. Conf. Communications. Workshops, Jun. 2014, pp. 907–911.
16. Basar E. Index modulation techniques for 5G wireless networks. IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, Jul. 2016.
17. Basar E. Multiple-input multiple-output OFDM with index modulation. IEEE Signal Processing Letters, vol. 22, no. 12, pp. 2259–2263, Dec. 2015.
18. Basar E. On multiple-input multiple-output OFDM with index modulation for next generation wireless networks. IEEE Trans. Signal. Proc., vol. 64, no. 15, pp. 3868-3878, Aug. 2016.
19. Datta T., Eshwaraiah H. S., Chockalingam A. Generalized space-and-frequency index modulation. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 7, pp. 4911-4924, July 2016.
20. Chakrapani B., Narasimhan T.L., Chockalingam A. Generalized Space-Frequency Index Modulation: Low-Complexity Encoding and Detection. IEEE Transactions on Signal Process. 2015.

#### REFERENCES:

1. Hanzo L., Akhtman Y.(J.), Wang L., Jiang M. MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMax. Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo-transceivers. – UK: J.W.S. 2011. – 658 с.
2. ETSI EN 300 744 V1.5.1 (2004-06) Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.

3. Basar E., Aygolu U., Erdal P., Poor V. Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation. IEEE transactions on signal processing. 2013.
4. Basar E., Wen M., Mesleh R., Renzo M., Xiao Y., Haas H. Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks. Special section on index modulation techniques for next-generation wireless networks. IEEE Access, vol. 5, pp. 16693 – 16746, 2017.
5. Cheng X., Zhang M., Wen M., Yang L. Index Modulation for 5G: Striving to Do More with Less. IEEE Wireless Communications, vol. 25, issue 2, pp. 126 - 132, April 2018.
6. Wen M., Cheng X., Ma M., Jiao B., Poor V. On the achievable rate of OFDM with index modulation. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 64, no. 8, pp. 1919-1932, Apr. 2016.
7. Abu-alhiga R., Haas H. Subcarrier-index modulation OFDM. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Communications. (PIMRC), Tokyo, Japan, Sep. 2009, pp. 177–181.
8. Tsonev D., Sinanovic S., Haas H. Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM. IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM), Houston, USA, Dec. 2011, pp. 728–732.
9. He Q., Schmeink A. A Better Decision Rule for OFDM with Subcarrier Index Modulation. WSA 2017; 21th International ITG Workshop on Smart Antennas.
10. Fan R., Yu Y.J., Guan Y.L. Generalization of orthogonal frequency division multiplexing with index modulation. IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 10, pp. 5350-5359, Oct. 2015.
11. Deepika M.J., Subhas C. Generalized Schemes of Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), volume 3, issue 9, Sep. 2016.
12. Basar E. OFDM with index modulation using coordinate interleaving. IEEE Wireless Communications Letter, vol. 4, no. 4, pp. 381–384, Aug. 2015.
13. Cheng X., Wen M., Yang L., Li Y. Index modulated OFDM with interleaved grouping for V2X communications. IEEE Int. Conf. Intellig. Transportation Systems, Oct. 2014, pp. 1097–1104.
14. Wen M., Cheng X., Yang L. Optimizing the energy efficiency of OFDM with index modulation. IEEE Int. Conf. Communications Systems, Nov. 2014, pp. 31–35.
15. Li W., Zhao H., Zhang C., Zhao L., Wang R. Generalized selecting sub-carrier modulation scheme in OFDM system. IEEE Int. Conf. Communications. Workshops, Jun. 2014, pp. 907–911.
16. Basar E. Index modulation techniques for 5G wireless networks. IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, Jul. 2016.
17. Basar E. Multiple-input multiple-output OFDM with index modulation. IEEE Signal Processing Letters, vol. 22, no. 12, pp. 2259–2263, Dec. 2015.
18. Basar E. On multiple-input multiple-output OFDM with index modulation for next generation wireless networks. IEEE Trans. Signal. Proc., vol. 64, no. 15, pp. 3868-3878, Aug. 2016.
19. Datta T., Eshwaraiah H. S., Chockalingam A. Generalized space-and-frequency index modulation. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 7, pp. 4911-4924, July 2016.
20. Chakrapani B., Narasimhan T.L., Chockalingam A. Generalized Space-Frequency Index Modulation: Low-Complexity Encoding and Detection. IEEE Transactions on Signal Process. 2015.

Солодовник В.И.

### СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ИНДЕКСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПОДНЕСУЩИХ OFDM ДЛЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ КАНАЛОВ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

*В статье обоснован выбор варианта упаковки бит, группирования поднесущих, оптимального размера субблока и количества активных поднесущих, объема модуляционного ансамбля сигналов для метода ортогонально-частотно-индексной модуляции OFDM-IM.*

*Проведенный анализ показал, что одной из основных задач современных военных систем беспроводной связи является качественная реализация объемных информационных мультимедийных приложений. Обеспечение высоких показателей надежности и скорости передачи информации в реальных беспроводных каналах связи усложняется из-за частотно-селективных замираний и доплеровского сдвига частот. Перспективным средством борьбы с межсимвольной интерференцией, вызванной частотной селективностью многолучевого канала, является технология ортогонального уплотнения с частотным разделением OFDM. Обеспечивая достаточно высокую степень использования канала по полосе частот, OFDM требует усовершенствования в части повышения энергетической и дальнейшего роста спектральной эффективности. Введение дополнительных измерений передачи в рамках широкого класса схем с*

индексной модуляцией IM позволяет одновременно повысить спектральную и энергетическую эффективность системы передачи. Метод OFDM-IM является более помехоустойчивым сравнительно с классическим OFDM. Кроме значительного энергетического выигрыша благодаря индексированию поднесущих OFDM, метод также позволяет получить выигрыш и по показателям спектральной эффективности.

В результате проведенных исследований разработаны рекомендации для повышения эффективности схемы OFDM-IM: в качестве варианта упаковки бит следует применять таблицы соответствия с размером субблока  $n \leq 8$  и ансамблями сигналов небольшого объема  $M = 2, 4$ , поскольку при  $M = n \geq 16$  помехоустойчивость метода OFDM-IM снижается, а выигрыш по показателям спектральной эффективности исчезает.

Ключевые слова: индексная модуляция, оптимизация, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, помехоустойчивость, спектральная эффективность.

Solodovnick V.I.

### STRUCTURAL-PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE OFDM SUBCARRIER INDEX MODULATION METHOD FOR FREQUENCY-SELECTIVE CHANNELS OF WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

*The article substantiates the selection of the variant of packing bits, grouping subcarriers, optimal sub-block size and the number of active subcarriers, the signal constellation size for the orthogonal-frequency-index modulation OFDM-IM method.*

*The conducted analysis showed that one of the main tasks of modern military systems of wireless communication is the qualitative realization of bulky information multimedia applications. Frequency selective fading and Doppler frequency shift complicate ensuring high reliability and speed of information transmission in real wireless communication channels. A promising mean for combating inter-symbol interference caused by the frequency selectivity of a multipath channel is the orthogonal frequency division multiplexing OFDM technology. Providing a fairly high bandwidth usage, OFDM needs improving in terms of increasing energy and further increasing spectral efficiency. The additional transmission entities within a wide class of index modulation IM schemes give an opportunity to increase simultaneously the spectral and energy efficiency of the transmission system. The OFDM-IM method is more noise-immune comparing to classical OFDM. In addition to a significant energy gain due to the OFDM subcarriers indexing, the method also gives higher achievable rates.*

*As a result of the conducted research, some recommendations have been developed to improve the effectiveness of the OFDM-IM scheme. As the variant of packing bits, the look-up tables with the size of sub-block  $n \leq 8$  and small signal constellation size ( $M = 2, 4$ ) should be used. This is because the noise-immunity of the OFDM-IM method with  $M = n \geq 16$  decreases, and the gain in terms of spectral efficiency disappears.*

*Keywords: index modulation, optimization, orthogonal frequency division multiplexing, noise-immunity, spectral efficiency.*