

УДК 621.396

д-р філософії Солодовник В. І. ORCID: 0000-0002-9113-7672 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МЕТОД ДВОРЕЖИМНОЇ ПРОСТОРОВО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ІЗ МОДИФІКОВАНИМИ АНСАМБЛЯМИ СИГНАЛІВ

У статті наведено вимоги до пропускної спроможності комунікаційної мережі вузлів зв'язку тактичної ланки управління Збройних Сил України в умовах відсічі відкритої збройної агресії РФ. Розглянуто деякі з сучасних станцій широкопasmового доступу та технічне підґрунтя їх ефективного функціонування. Здійснено наголос на те, що при обмежених просторово-частотно-енергетичних ресурсах надважливою задачею є удосконалення відомих та розробка нових способів передачі інформації з метою наближення ефективності використання безпроводового каналу до теоретичних меж. Проаналізовано сімейство методів індексної модуляції сигналів, що дозволяють підвищити швидкість передачі цифрової інформації та/або покращити завадостійкість завдяки введенню додаткових сигнальних вимірів, що забезпечують формування та передачу певної частини інформаційних біт шляхом реалізації неявного інформаційно-керованого механізму перемикання стану активності допоміжних блоків передачі. Акцентовано увагу на методах просторової та індексної ортогонально-частотної модуляції сигналів. Запропоновано удосконалений метод дворежимної просторово-поляризаційної модуляції, в основі якого – поєднання в єдину сигнально-кодову конструкцію відомих методів просторово-поляризаційної та дворежимної OFDM модуляції із модифікованими ансамблями сигналів BPSK, QPSK та 16-QAM. Наведено аналітичні вирази для розрахунку показників спектральної ефективності згаданої сигнально-кової конструкції. Продемонстровано, що запропонована сигнальна конструкція зберігає переваги її складових – методу розширеної просторової модуляції, поляризаційної просторової модуляції та дворежимної OFDM-IM. Показано обмеження методу в частині вибору кількості антен, розміру субблоків піднесучих і видів модуляції сигналів. Наведено обчислювальну складність реалізації детектора максимальної правдоподібності та наголошено на необхідності розробки субоптимальних методів декодування сигналів.

Ключові слова: індексна модуляція, просторово-поляризаційна модуляція, MIMO, OFDM, спектральна та енергетична ефективність, модифікований ансамбль сигналів.

V. Solodovnyk. Dual-mode spatial-polarization modulation method with modified signal constellations

The article presents the requirements for the bandwidth of the tactical communication network of Armed Forces of Ukraine in the conditions of repelling open armed aggression of the Russian Federation. Some of the modern broadband access stations and the technical basis of their effective functioning are considered. It is emphasized that with limited spatial-frequency-energy resources, an extremely important task is to improve known and develop new methods of information transmission in order to bring the efficiency of using a wireless channel closer to theoretical limits. A family of Index Modulation methods of signals is analyzed, which allow increasing the speed of digital information transmission and / or improving noise immunity due to the introduction of additional signal measurements that ensure the formation and transmission of a certain part of information bits by implementing an implicit information-controlled mechanism for switching the activity state of auxiliary transmission units. Attention is focused on the methods of spatial and index orthogonal frequency modulation of signals. An improved method of Dual-Mode Spatial-Polarization Modulation is proposed, which is based on the combination into a single Signal-Code Construction of the known methods of Spatial-Polarization and Dual-Mode OFDM modulation with modified Constellations of BPSK, QPSK and 16-QAM signals. Analytical expressions for calculating the spectral efficiency of the mentioned Signal-Code Construction are given. It is demonstrated that the proposed Signal Construction retains the advantages of its components – the methods of Generalized Spatial Modulation, Spatial-Polarization Modulation and Dual-Mode OFDM-IM. The limitations of the method in terms of choosing the number of antennas, the size of subcarrier subunits and signal modulation types are shown. The computational complexity of implementing the Maximum Likelihood detector is given and the need to develop suboptimal signal decoding methods is emphasized.

Keywords: Index Modulation, Spatial-Polarization Modulation, MIMO, OFDM, Spectral and Energy Efficiency, Modified Signal Constellation.

Постановка проблеми в загальному вигляді

В умовах нових викликів, зумовлених агресією російської федерації проти України у системах зв'язку тактичної ланки управління широкого використання набули мережі з можливістю високошвидкісної передачі даних, які відповідають необхідним умовам для використання різного роду сервісів як ситуаційної обізнаності, так і відеотрансляцій. До згаданих сервісів належать національна військова система ситуаційної обізнаності

“Дельта” (Delta), програмні засоби системи “Вираж-планшет”, бойова система управління тактичної ланки “Кропива”, система збору даних за допомогою розвідувальних та ударних дронів “Очі”, системи ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target, Acquisition and Reconnaissance), “Вежа”, Palantir, ComBat Vision, “Термінал” та інші, менш відомі внаслідок об’єктивних причин.

Основою функціонування таких мультисервісних мереж став термінал супутникового зв'язку (ТСЗ) Starlink. Беззаперечними перевагами терміналу стали простота експлуатації, прийнятна мобільність, достатня швидкість передачі даних. Із початком використання цього обладнання час готовності системи зв'язку зменшився в рази. Ефективність відеотрансляцій під час ведення бойових дій є беззаперечною і підтвердженою часом. Водночас, змінилися й вимоги до системи зв'язку, особливо до її пропускної спроможності. Нині для забезпечення ефективного функціонування пунктів управління (ПУ) бригади повинна бути реалізована наступна пропускна спроможність комунікаційної мережі вузлів зв'язку (ВЗ) [1]:

на основному командному пункті (ОКП) бригади – від 500 Мбіт/с до 1 Гбіт/с;

на командно-спостережному пункті (КСП) батальйону – від 200 Мбіт/с до 500 Мбіт/с;

на КСП роти – від 150 Мбіт/с до 300 Мбіт/с.

Як правило, зазначена пропускна спроможність комунікаційних мереж ВЗ ПУ бригади та батальйонів реалізується шляхом побудови ліній прив'язки (радіомостів) станціями широкопasmового доступу (СШД) до Національної телекомунікаційної мережі (НТМ), а також до мереж операторів комунікаційних послуг. До таких засобів належать станції відомих вендорів MikroTik, Ubiquiti, Cambium Networks, Radwin, Ericsson, L3Harris тощо.

Залежно від умов обстановки можливе розгортання волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) від вузла зв'язку (ВЗ) ПУ до точки доступу до мережі Інтернет. Видача комунікаційного ресурсу складовим Сил оборони здійснюється згідно зі встановленим порядком відповідно до бойових розпоряджень спеціально створеними органами – Військовими комендатурами зв'язку.

У такому випадку ТСЗ Starlink виконують роль резервних засобів. На КСП рот і нижче, а також на позиціях розрахунків операторів БпЛА, ТСЗ Starlink не є єдиним засобом, який дозволяє створити високошвидкісні IP-з'єднання. Альтернативою терміналам Starlink є мобільні СШД Silvus StreamCaster серії 4000, Persistent Systems MPU, TrellisWare TSM та Radionor. Комплексному порівняльному аналізу функціональних характеристик згаданих радіозасобів присвячено [2]. Кожен із виробників розкриває теоретичні пікові швидкості передачі даних, що можуть бути досягнуті в мережі, величину затримки, масштабованість мережі, стійкість до навмисних і природніх завад, заявляючи про “унікальну форму хвилі”. Відомо лише про те, що найчастіше основою ефективного функціонування таких засобів безпроводового зв'язку є технологія багатоантенних систем МІМО (Multiple Input Multiple Output), ортогонально-частотне мультиплексування із виявленням та виправленням помилок (Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, COFDM), методи розширення спектра на базі псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) або прямого розширення спектра DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), а також можливість формування децентралізованої, мобільної, здатної до самоорганізації, IP-мережі MANET (Mobile Ad hoc Network) [3–7]. Разом із тим, в усіх зазначених засобах реалізовано адаптацію (залежно від заводських умов) видів і розмірів (M) багатопозиційних ансамблів сигналів фазової (Phase Shift Keying, M -PSK) або квадратурно-амплітудної модуляції (Quadrature Amplitude Modulation, M -QAM), а також швидкості коректуючого коду (Forward Error Correction, FEC) за технологією AMC (Adaptive Modulation and Coding) [1–7].

Постійно зростаючі вимоги до швидкості та надійності систем безпроводового зв'язку спонукають світову наукову спільноту до пошуку нових методів передачі інформації, що забезпечать значно вищі показники спектральної та енергетичної ефективності (СЕ та ЕЕ), ніж

вдалося досягнути на теперішній час [8; 9]. В умовах дефіциту просторово-частотно-енергетичних ресурсів таке завдання є надзвичайно актуальним і складним.

Традиційні екстенсивні шляхи підвищення показників СЕ та ЕЕ, пов'язані зі збільшенням кількості ретрансляційних пунктів, потужності випромінювання, об'єму ансамблю сигналів тощо вичерпали себе ще 20 років тому. Підвищити швидкість передачі даних можливо завдяки введенню додаткових сигнальних вимірів, що забезпечують формування та передачу певної частини інформаційних біт шляхом реалізації неявного інформаційно-керованого механізму перемикання стану активності допоміжних блоків трансляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні 15 років розроблено широкий клас схем з індексною модуляцією сигналів (Index Modulation, IM) [10; 11], в яких інформаційні біти можуть приєднуватись до різних фізичних або віртуальних блоків передачі. У роботах [10–12] наведено приклади нових додаткових сигнальних вимірів: часовий (тактові інтервали), частотний (піднесучі OFDM), просторовий (передавальні та приймальні антени, LED), кодовий (коди розширення спектра, типи модуляції, матриці прекодування, дисперсійні матриці), кутовий (кути прибуття променів, види поляризації), енергетичний (потужність сигналів).

Для релеївських каналів найбільш привабливими є методи просторової модуляції (Spatial Modulation, SM), що дозволяють одночасно підвищити надійність та швидкість передачі інформації завдяки додатковому введенню просторового виміру сигналів [12]. Метод SM дозволяє передавати інформацію, активуючи одну передавальну антену з усіх доступних із використанням тривимірного просторового-сигнального ансамблю. Порівняно з класичним методом просторового мультиплексування (Spatial Multiplexing, SMX) типу V-BLAST [11–13], метод SM забезпечує компроміс за показниками СЕ/ЕЕ залежно від розмірності MIMO, типів модуляції тощо; зниження обчислювальної складності приймача; гнучкість налаштувань системи; можливість роботи в режимі Multiple Input Single Output (MISO) – прийом на одну антену; зниження міжантенної інтерференції та спрощення вимог до синхронізації між передавальними антенними елементами.

Метод SM сумісний із масивними MIMO (більше 64 антенних елементів), проте при кількості передавальних антен (від восьми) його ефективність є низькою, оскільки невелика кількість класичних модуляційних біт не може компенсувати втрати СЕ через деактивацію всіх доступних активних антен, крім однієї. Зазначений недолік усунуто у методі розширеної SM (Generalized SM, GSM) із активацією не менше двох передавальних антен, що є поєднанням методів SM та SMX [11].

Завадостійкий (Robust) варіант розширеної просторової модуляції RGSM [12] також передбачає активацію не менше пари антен, проте для передачі одного і того ж символу M-PSK/QAM. Одночасна надлишкова передача одного модуляційного символу кількома передавальними антенами збільшує кількість його копій, що обробляються на приймальній стороні, забезпечуючи просторове рознесення сигналів. Внаслідок зазначеного метод RGSM не є конкурентним за показником СЕ.

У завадостійкому методі просторової маніпуляції SSK (Space Shift Keying) [11–13] та його аналогічних удосконаленнях здійснюється передача лише індексних біт у просторовому вимірі, які є робастнішими, ніж класичні. Разом із тим, дослідження показали, що всі методи IM є найбільш ефективними при досягненні компромісу в кількості біт [12]. Таким чином, метод SSK є частковим випадком SM, оскільки використовує виключно індекс єдиної активної антени для передачі інформації [12] без передачі класичних модуляційних символів. Проблему обмеженої швидкості передачі даних у SSK через використання однієї активованої антени вирішено у методі розширеної просторової маніпуляції (Generalized SSK, GSSK), де група антен одночасно активується для передачі різних або однакових сигналів – мультиплексний та робастний варіант GSKK, відповідно.

Удосконаленням методу SM, як базовому серед індексних, присвячено неймовірну кількість наукових робіт. Відомий метод GSM зі змінною кількістю активних передавальних антен (Variable Active) – VA-GSM [12], в якому у таблиці асоціативності (формується у передавачі та відома приймачу) одночасно фігурують позиції з однією та кількома активними антенами, проте в останньому випадку – для передачі одного і того ж символу M-PSK/QAM. Такий підхід дозволяє збільшити кількість індексних біт, та, відповідно, їхній внесок у загальну SE.

Крім того, відомий метод квадратурної просторової модуляції (Quadrature Spatial Modulation, QSM) та його розширена версія GQSM, поєднаної приймально-передавальної просторової модуляції JSM (Joint Transmitter-Receiver Spatial Modulation) та навіть GSM для технології VLC (Visible Light Communication) [11–13] із активацією деякої частини доступних світлодіодів не тільки для освітлення, але й для передачі даних. Усі зазначені удосконалення базового методу просторової модуляції SM розроблені для квазістаціонарних релеївських каналів із низьким рівнем частотної селективності та, як наслідок, відсутністю міжсимвольної інтерференції (Inter-Symbol Interference, ISI). В умовах щільної міської забудови рівень ISI може бути критичним, тому ігнорувати таку проблему неможливо. Подолати значне зниження завадостійкості внаслідок частотно-селективних завмирань рекомендовано шляхом формування ще з передачі сигналу, що буде стійким до ISI. Це досягається використанням модуляції OFDM або її альтернативами – SC-FDE (Single-Carrier Frequency Domain Equalization), що використовується в стандарті LTE, або методу FBMC (Filter Bank Multi-Carrier) – одного із головних кандидатів на розвиток мереж після 5G [13]. Водночас, класична модуляція OFDM потребує удосконалення в частині підвищення SE.

Окрім стану активації антен, дослідники також запропонували використовувати стан поляризації антен для розробки нового класу схем IM. У цих схемах основним елементом антени служить двополяризована (Dual Polarized, DP) антена, яка складається з пари розташованих поруч ортогонально поляризованих компонентів – вертикального (Vertical, V) та горизонтального (Horizontal, H) [14]. Таким чином, стан поляризації антен був використаний як коефіцієнт, що несе інформацію. У [14] запропоновано використовувати не тільки V та H стани поляризації передавальної антени, але й лінійну, кругову та еліптичну. Інтеграція просторового та поляризаційного доменів дозволила додатково підвищити потенціал антен з погляду IM. Автори [14] інтегрували поляризаційний домен у звичайний SM, утворюючи DP-SM. У цій схемі потрібен лише один радіочастотний (Radio Frequency, RF) ланцюг для підтримки DP-SM, що істотно покращує продуктивність системи в високочорельованих каналах. Разом із тим, відомий метод просторово-поляризаційної модуляції (Spatial Polarized Modulation, SPM) потребує подальшого удосконалення в частині підвищення спектральної ефективності. Крім того, частотна селективність реальних безпроводових каналів може звести нанівець всі переваги від індексування у просторі та у поляризаційному домені. Для вирішення проблеми низького показника SE та низької завадостійкості внаслідок ISI може бути застосований підхід, реалізований у дворезимній індексній модуляції, що використовується у методі Dual-Mode OFDM-IM [15], де для передачі символів модифікованих ансамблів сигналів задіяні всі ортогональні піднесучі. Введення додаткового виміру модифікованих сигналів дає можливість одночасно підвищити завадостійкість та швидкість передачі інформації.

Наукове завдання полягає у розробці та дослідженні модифікованого методу просторово-поляризаційної модуляції на основі концепції дворезимної індексної модуляції базових ансамблів сигналів.

Метою статті є удосконалення методу просторово-поляризаційної модуляції в частині підвищення спектральної ефективності на основі реалізації дворезимної модуляції базових ансамблів сигналів у безпроводових каналах зі значним рівнем багатопроменевості.

Виклад основного матеріалу. Розглядається симетрична когерентна багатоантенна система MIMO розмірності $[N_T \times N_R]$ у квазістатичному релеївському каналі із частотно-селективними завмираннями. Спрощена структурна схема такої системи наведена на рисунку 1. Інформація про стан каналу (Channel State Information, CSI) передавачу невідома; на прийомі оцінка CSI та синхронізація вважаються ідеальними. На вхід кожного приймача надходить вектор сигналів \mathbf{y} , що є сумою спотвореного каналом корисного сигналу та шуму:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n},$$

де \mathbf{s} – вектор сигналів, що підготовлений для одночасної передачі активними передавальними антенами; \mathbf{H} – матриця комплексних каналних коефіцієнтів, що змінюється з кожним кодовим словом; \mathbf{n} – вектор комплексного адитивного білого гаусівського шуму AWGN (Additive White Gaussian Noise) розмірності з нульовим середнім та дисперсією σ^2 [12].

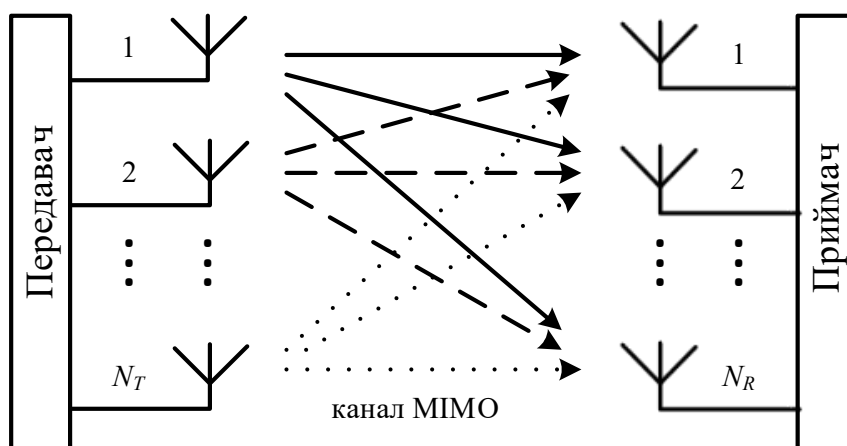


Рис. 1. Структурна схема класичної системи MIMO [12]

За достатньо високого відношення сигнал/ шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) у безпроводовому каналі (від 20 дБ) більшість багатоантенних систем працюють у режимі просторового мультиплексування SMX, коли кожна передавальна антена активується для передачі індивідуального потоку біт, забезпечуючи таким чином показник спектральної ефективності (СЕ) $\eta_{CE} = N_T \cdot \log_2 M$ біт/с/Гц. Таке є можливим лише за достатнього рознесення приймальних і передавальних антен, а також виконання умови $N_R \geq N_T$ для декодування та демодуляції незалежних просторових потоків на приймачі.

Водночас доведено, що введення додаткових вимірів передачі сигналів на основі концепції індексної модуляції сигналів дозволяє завдяки просторовій модуляції сигналів досягнути більших показників СЕ, порівняно навіть із режимом SMX. Наприклад, за умови правильного підбору загальної кількості передавальних антен N_T (розмірності MIMO), кількості активних передавальних антен N_A та модуляції BPSK на основі мультиплексного методу SMX-SM можливо забезпечити показник СЕ 5 біт/с/Гц, що на 1 біт/с/Гц більше у кожному тактовому інтервалі порівняно із показником класичного методу V-BLAST (табл. 1). При цьому, завадостійкість та складність декодування не погіршується, оскільки у методі SMX-SM (4, 3) одна з чотирьох антен не випромінює (режим idle). Формули для розрахунку показників спектральної ефективності у таблиці 1 узагальнено на основі аналізу матеріалів статей [11–14], а конкретні показники η_{CE} [біт/с/Гц] – отримано шляхом підстановки в аналітичні вирази показників СЕ класичних видів модуляції BPSK, QPSK та 16-QAM (становить 1 біт/с/Гц, 2 біт/с/Гц та 4 біт/с/Гц відповідно). Згідно із концепцією

просторової модуляції, у кожному тактовому інтервалі передається $m = p_1 + p_2 = \log_2 N_T + \log_2 M$ біт, перша частина з яких ($p_1 = \log_2 N_T, N_T = 2^{p_1}$) називається індексною та визначає номер активної антени N_A , а друга ($p_2 = \log_2 M$) – класичною та визначає модуляційний символ для передачі. Слід зауважити, що у науковій літературі активовані антени можуть позначатися як N_A , так і $\overline{N_T}$. У таблиці 1 прийнято такі позначення

показників СЕ: $\eta_{SM} = \left\lceil \log_2 C \frac{N_T}{N_A} \right\rceil + \log_2 M$, де $\lceil x \rceil = \max\{a \in Z | a \leq x\}$, Z – множина цілих

чисел; $C \frac{N_T}{N_A}$ – кількість комбінацій (біноміальний коефіцієнт) із N_T по N_A , з невеликим

внеском p_2 .

У частотно-селективних безпроводових каналах зі значним рівнем багатопроменевості уникнути завмирань та міжсимвольної інтерференції (ISI) дозволяє модуляція OFDM, що є основою (з удосконаленнями) засобів поколінь мобільного зв'язку 4G та 5G, а також перспективного 6G, і сучасних станцій широкосмугового доступу типу Silvus, Harris. Таким чином, метод SMX-SM-OFDM, для всенаправлених (omni) антен, може бути удосконалений в частині підвищення показника СЕ шляхом застосування двополяризаційних (Dual Polarized, DP) антен на основі концепції, описаної у [14], а індексування додатково можливо здійснити у частотному вимірі – тобто, у кожному символі OFDM – на основі використання модифікованих ансамблів сигналів BPSK, QPSK, 16-QAM, запропонованих у [15].

Таблиця 1

Аналітичні вирази для розрахунку СЕ методів передачі SM, SMX-SM та V-BLAST у MIMO 4x4 для різних розмірів M ансамблю сигналів

Метод	SM (4, 1)	SMX-SM (4, 2)	SMX-SM (4, 3)	V-BLAST (4, 4)
Формула для СЕ	$\eta_{SM} = \left\lceil \log_2 C \frac{N_T}{N_A} \right\rceil + \log_2 M$	$\eta_{SMX-SM} = \left\lceil \log_2 C \frac{N_T}{N_A} \right\rceil + N_A \cdot \log_2 M$		$\eta_{V-BLAST} = N_T \cdot \log_2 M$
η_{CE} , біт/с/Гц	BPSK			
	3	4	5	4
	QPSK			
	4	6	8	8
η_{CE} , біт/с/Гц	16-QAM			
	6	10	14	16

Структурну схему запропонованого методу дворежимної просторово-поляризаційної модуляції із модифікованими ансамблями сигналів DM-SP-OFDM (Dual Mode Spatial Polarized OFDM) наведено на рисунку 2.

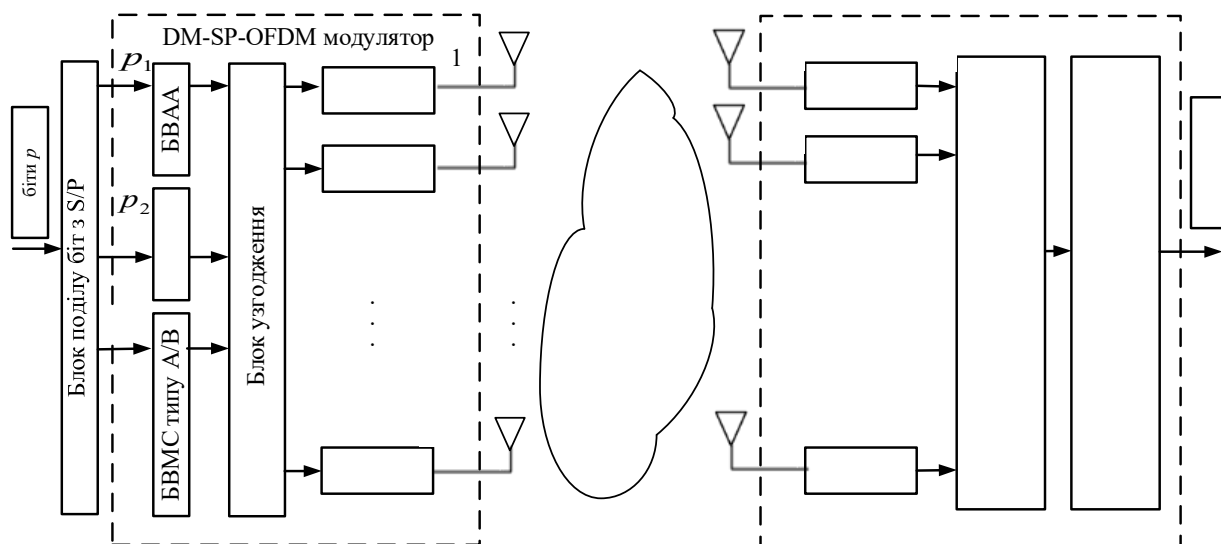


Рис. 2. Структурна схема методу DM-SP-OFDM

Вхідна послідовність з $p = p_1 + p_2 + p_3$ біт після послідовно-паралельного перетворення (Serial-to-Parallel, S/P) надходить у модулятор DM-SP-OFDM. У блоці вибору активних антен (БВАА) індексні (просторові) біти $p_1 = \left\lfloor \log_2 C \frac{N_T}{N_A} \right\rfloor$ використовуються для вибору N_A активних антен з N_T доступних. На виході БВАА формуються набори N_A на кожній піднесучій OFDM.

У блоці вибору типу поляризації (БВТП) формуються набори з $p_2 = N_A \cdot \log_2 X$ біт, що визначають єдину поляризаційну матрицю з X можливих для визначення типу поляризації активованих двополяризаційних антен. Зауважимо, що кількість типів поляризацій може бути розширено та узагальнено.

Блок вибору модуляційних символів (БВМС типу А/В) призначений для формування піднаборів індексів піднесучих, що будуть задіяні для передачі модуляційних символів двох типів (А та В) у кожному символі OFDM під час кожного тактового інтервалу.

При цьому показник спектральної ефективності класичного методу DM-OFDM-IM [15] може бути збільшений завдяки додатковому просторовому виміру. У показнику СЕ

$$\eta = \left\lfloor \log_2 C \frac{N}{K} \right\rfloor + K \cdot \log_2 M_A + (N - K) \cdot \log_2 M_B$$

перший доданок – біти, що використовуються

для визначення K піднесучих, які модулюються символами ансамблю сигналів $\mathbf{D}(M_A)$ типу A розміром M_A у кожному субблоці DM-OFDM-IM довжиною $N = N_F / G$; N_F – загальна кількість піднесучих OFDM – розмір вікна зворотного швидкого перетворення Фур'є (Inverse

Fast Fourier Transform, IFFT); $C \binom{N}{K}$ – кількість комбінацій із N по K . Решта $(N - K)$

піднесучих модулюються символами ансамблю сигналів $\mathbf{D}(M_B)$ типу B розміром M_B . Слід зазначити, що для надійного детектування індексних біт при обмеженні на однаковий розмір ансамблів сигналів ($M_A = M_B = M$), необхідно забезпечити можливість їх розрізняти: $M_A \cap M_B = \emptyset$ [13].

Для базових видів модуляції QPSK та 16-QAM запропоновано вигляд таких модифікованих ансамблів сигналів – Constellation (рис. 3).

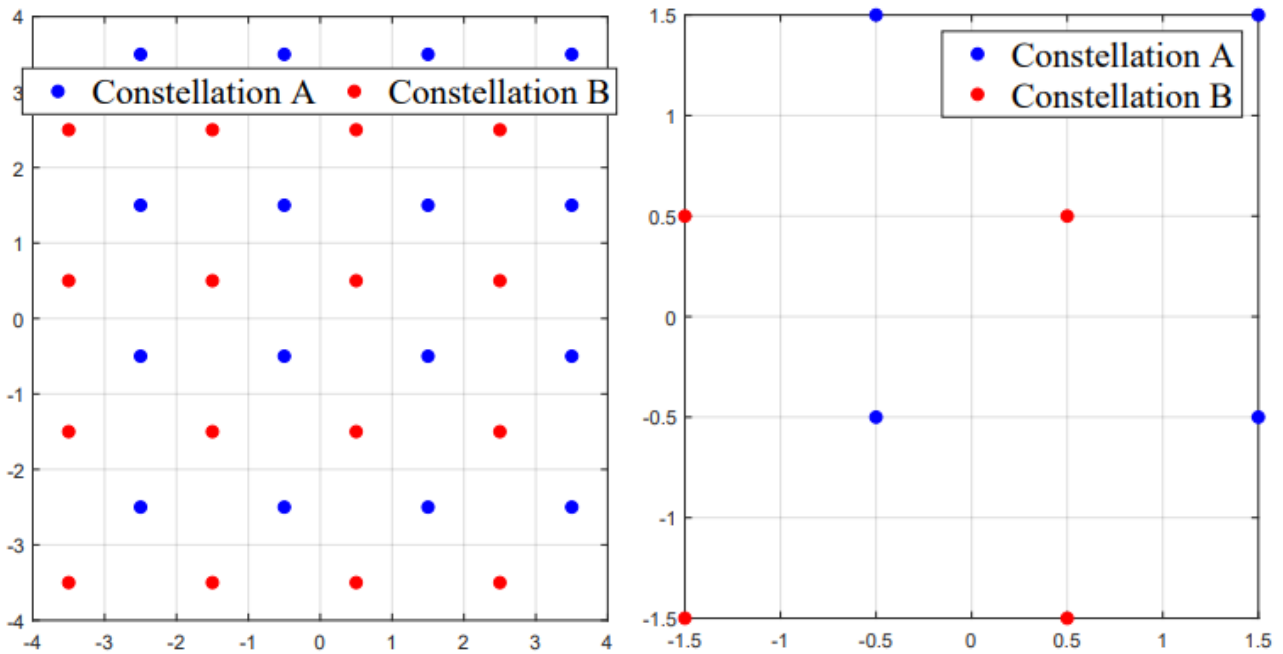


Рис. 3. Пари сигнальних сузір'їв QPSK (зліва) та 16-QAM (справа) для дворежимної індексної модуляції [15]

Дві пари сигнальних точок BPSK можуть виглядати, очевидно, як протифазні символи (A; C) на дійсній осі (I – In-phase) та (B; D) – на уявній осі (Q – Quadrature) на комплексній площині (рис. 4).

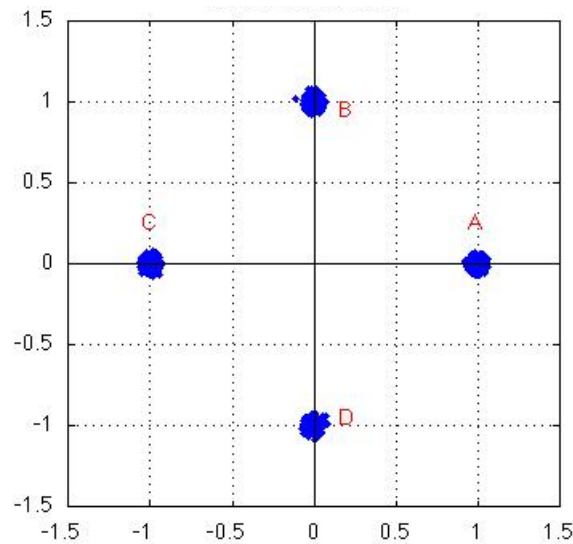


Рис. 4. Пари сигнальних сузір'їв BPSK

Дослідження показують, що безпомилково розрізнити сигнальні точки з таким дворежимним підходом у модуляціях більш високих розмірностей ($M > 32$) практично неможливо, тому рекомендовано зупинитись при хороших заводових умовах (високих показниках SNR, за відсутності навмисних завад) на модуляції 16-QAM [15].

Отже, у запропонованому удосконаленому методі DM-SP-OFDM за рахунок двополяризаційності антен та дворезимності модуляції значення частини біт

$$p_3 = N_A \cdot \left(\log_2 C_{K}^N + K \cdot \log_2 M_A + (N - K) \cdot \log_2 M_B \right).$$

У блоці узгодження формується матриця передачі на основі таблиць асоціативності (Look-Up-Tables, LUT). Приймачу заздалегідь відомі всі можливі комбінації активності антен, їх поляризації та можливих дворезимних видів модуляції. Найскладніша задача приймача – розрізнити, які саме антени були задіяні для передачі, з якою поляризацією та здійснити демодуляцію, виявивши всі складові набору біт p .

Після виконання процедури зворотнього швидкого перетворення Фур'є (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), формування пілот-сигналів, додавання циклічного префіксу CP (Cyclic Prefix), паралельно-последовного (Parallel-to-Serial, P/S) та цифро-аналогового перетворення (ЦАП) здійснюється одночасна передача сформованих сигналів за допомогою пари активних антен N_A [13].

На приймальній стороні – зворотні перетворення: після прямого швидкого перетворення Фур'є (FFT) на вході декодера формується сигнальний вектор із частотною характеристикою кожного з каналів та доданого в каналі адитивного білого гаусівського шуму (AWGN). Після обчислення каналних коефіцієнтів для кожної антени та піднесучих детектор максимальної правдоподібності ML (Maximum Likelihood) формує оцінки комплексних символів, активних антен та поляризації [13]. На основі відомих таблиць LUT визначаються біти p_1, p_2, p_3 .

Обчислювальна складність реалізації ML-детектора за кількістю операцій комплексного множення становить $O\left(2 \cdot N_A \cdot C_{N_A}^{N_T} C_K^N M_A^N M_B^{N-K}\right)$ для кожного субблоку, що демонструє неможливість його практичного застосування при великих значеннях розмірів ансамблю сигналів M та розмірів субблоку N , а також у Massive MIMO з кількістю $N_T \geq 64$. У таких випадках часто використовуються субоптимальні алгоритми декодування, що окремо визначають індексні та модуляційні біти, через що втрачається ЕЕ. Таким чином, обмеженнями для запропонованого методу в частині прийнятної складності процесів обробки сигналів на приймачі (детектор-декодер) є $M \leq 16, N_T \leq 32, N \leq 4$.

Результати моделювання. Оцінку енергетичної ефективності запропонованого методу проведено з використанням пакету Simulink у середовищі імітаційного моделювання MATLAB. Узагальнені параметри безпроводових каналів, що моделюються, є типовими для сучасних систем безпроводового зв'язку та близькі до моделей, що розглядаються у [11–15]: кількість піднесучих OFDM – 1024; розмір циклічного префіксу – 32; частота несучого коливання – 5 ГГц; частотний інтервал між піднесучими – 15 кГц; доплерівський зсув частот – 10 Гц; кількість променів – 30; середньоквадратичне значення затримки в каналі – 3,48 мкс; вид модуляції – BPSK (модифікований); розмір MIMO – 4×4 .

На рисунку 5 порівнюється завадостійкість запропонованого методу DM-SP-OFDM, мультиплексного SMX-SM-OFDM та класичного методу просторового мультиплексування VBLAST-OFDM. В усіх методах застосовується схема MIMO 4×4 , проте активується різна кількість активних передавальних антен (N_A, N_R). Для вирівнювання показника СЕ всіх методів до 6 біт/с/Гц застосовано такі види модуляції, кількість активних передавальних антен (кількість приймальних антен фіксована – чотири):

VBLAST-OFDM (3, 4), QPSK – три активних передавальних антени, модуляція QPSK;

SMX-SM-OFDM (2, 4), QPSK – дві активних передавальних антени, модуляція QPSK;

DM-SP-OFDM (2, 4), BPSK – дві активних передавальних антени, модуляція BPSK.

Для скорочення записів у “легенді” (рис. 5) частина назви “-OFDM” не вживається.

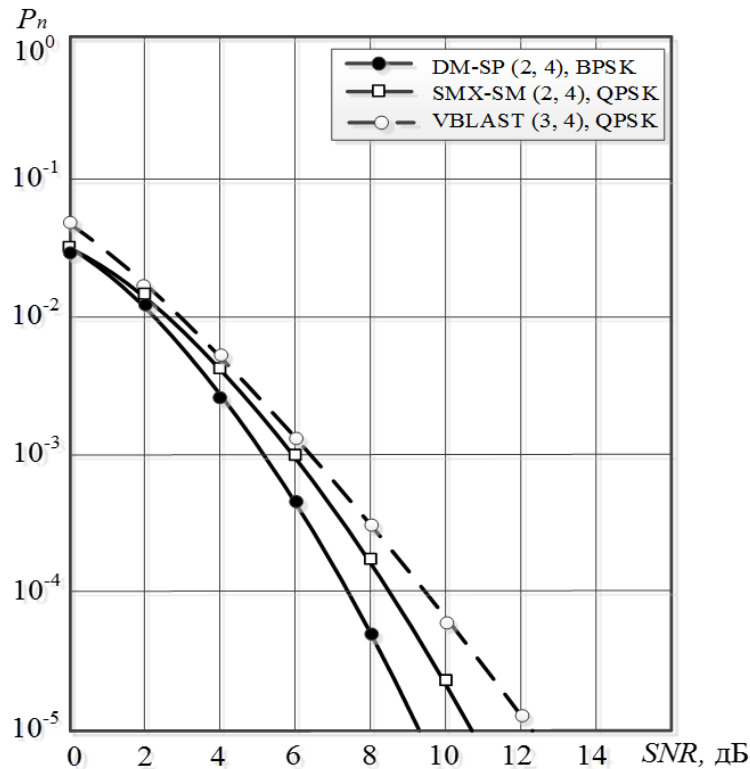


Рис. 5. Завадостійкість методів DM-SP-OFDM, SMX-SM-OFDM та VBLAST-OFDM

Аналіз кривих завадостійкості (див. рис. 5) показує, що для СЕ 6 біт/с/Гц запропонований метод DM-SP (2, 4) забезпечує енергетичний виграш (ЕВ) близько 4 дБ порівняно із традиційним VBLAST при ймовірності бітової помилки $P_n = 10^{-5}$ (Bit Error Rate, BER), оскільки перший використовує ансамбль сигналів меншого об'єму (BPSK) та з активацією лише половини передавальних антен (дві), а класичний VBLAST – три антени із модуляцією більшого розміру QPSK. Слід зауважити, що в усіх методах рисунку 5 активуються всі піднесучі на активних антенах, із тією відмінністю, що тільки у запропонованому методі – дворежимний BPSK (пари сигнальних точок повернуті на 90° одне відносно одного), що дає можливість забезпечити передачу двох додаткових біт неявних способом – за рахунок комбінацій активації у субблоці $N = 4$ піднесучих половини піднесучих ансамблем M_A , а іншої половини – M_B .

Метод часткового мультиплексування SMX-SM активує лише пару передавальних антен, як і запропонований DM-SP, проте із ансамблем сигналу більшого розміру – QPSK, через що програє останньому близько 2 дБ при тій самій достовірності ($P_n = 10^{-5}$).

Як і всі методи індексування у часі/частоті/просторі, метод DM-SP-OFDM втрачає енергетичну ефективність при збільшенні розміру ансамблю сигналів через зближення сигнальних точок та ускладнення процесу безпомилкового одночасного визначення активованих антен, поляризації антен та сигнальних точок, що передавались. Загальновідомо [11; 12], що окреме почергове визначення на приймачі індексних та класичних частин біт за алгоритмом максимальної правдоподібності ML може призводити до критичного накопичення помилок при погіршенні відношення сигнал/шум (SNR), коли неточне визначення активованих передавальних антен призводить до помилкового визначення також і модуляційних символів. Подальше підвищення СЕ (безпосередньо потребує активації більшої кількості антен та менш завадостійкого виду модуляції QPSK) призводить до збільшення інформаційного навантаження на всі піднесучі та антени, через що показник ЕЕ індексних

методів різко зменшується. Саме через це рекомендовано використовувати метод DM-SP із найзавадостійкішим видом модуляції – BPSK. Обрана розмірність МІМО та виду модуляції також дозволяє застосування в усіх згаданих методах МЛ-детектування.

Отримані результати імітаційного моделювання не суперечать закордонним дослідженням завадостійкості індексних методів, оскільки складові запропонованої сигнально-кової конструкції (СКК) забезпечують ЕВ порівняно із класичними “неіндексними” методами до 5 дБ при ймовірності бітової помилки $P_n = 10^{-5}$ при різних вихідних даних [11–15], чого достатньо для реалізації більшості сервісів ситуаційної обізнаності. Отриманий ЕВ можливо використати з різною метою: для зменшення потужності передавача; підвищення рівня достовірності прийому інформації; зменшення вимог до чутливості приймача; збільшення зони покриття базової станції; підвищення швидкості передачі інформації. Разом із тим, головна перевага запропонованої СКК полягає у підвищенні СЕ на 25–67 % (залежно від обраного розміру модуляційного ансамблю сигналів) без залучення додаткових ресурсів ціною незначного ускладнення приймача. На сучасному етапі розвитку схемотехніки таке питання не є катастрофічним.

Висновки. В умовах обмеженості просторово-частотно-енергетичних ресурсів удосконалення відомих і розробка нових способів передачі інформації з метою наближення ефективності використання безпроводового каналу до теоретичних меж є вкрай важливою задачею. Наукова новизна запропонованого методу полягає в удосконаленні відомого методу просторово-поляризаційної модуляції в частині підвищення його спектральної ефективності у частотно-селективних квазістаціонарних каналах на основі реалізації дворезимної індексної модуляції піднесучих OFDM модифікованими ансамблями сигналів. Для модифікованої модуляції BPSK приріст показника СЕ складає до 2 біт/с/Гц порівняно із класичним методом просторового мультиплексування VBLAST-OFDM при однаковій фіксованій кількості активованих антен, для розміру субблоку $N = 4$, без втрати енергетичної ефективності методу. За умови фіксованої СЕ, запропонований метод DM-SP забезпечує енергетичний вигравш до 4 дБ для прийнятної на сьогодні ймовірності бітової помилки $P_n = 10^{-5}$. Практична цінність удосконаленого методу DM-SP-OFDM – у можливості передавати, залежно від використаного виду модуляції, на 25–67 % більше інформації (відеострімів із безпілотних літальних апаратів (БпЛА), телеметрії тощо) без розширення смуги частот, потужності передавача, збільшення кількості активних антен.

Перспективним напрямком подальших досліджень є оцінка можливості удосконалення запропонованого методу на основі антенних елементів із круговою, еліптичною та іншими видами поляризації, а також розробка спрощених субоптимальних методів декодування сигналів на основі алгоритму логарифмічного відношення правдоподібності LLR (Log-Likelihood Ratio).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Посібник щодо застосування станцій широкосмугового доступу Silvus з урахуванням досвіду ведення бойових дій / під ред. Д. О. Романова / Г. Д. Радзівілов, О. В. Сілко, А. О. Зарубенко, М. М. Фомін, О. Л. Свечков, В. О. Хмарюк. К.: ВІТІ, 2024. 187 с.
2. Хоменко П. В., Радзівілов Г. Д., Ільїнов М. Д. Аналіз функціональних характеристик сучасних радіозасобів класу MANET // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. 2025. № 7. С. 222–231. DOI: 10.58254/viti.7.2025.20.222.
3. Silvus SC4400 Data Sheet. URL: <https://www.silvustechnologies.com>.
4. Spectrum Dominance: Delivering LPI/LPD and Anti-Jamming Without Sacrificing Performance. URL: <https://silvustechnologies.com/blog/resilient-mesh-network-communications/>.

5. Royal Marines field over 1,000 Persistent Systems MPU5 to Support Future Commando Force. URL: <https://fragoutmag.com/royal-marines-field-over-1000-persistent-systems-mpu5-to-support-future-commando-force/>.
6. TSM Waveform: The Gold Standard for Mission-Critical Communications. URL: <https://trellisware.com>.
7. Phased Array Tactical Broadband: Exceptional Resistance to Jamming and Precise Localization. URL: <https://radionor.no/domain/infrastructure/>.
8. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf.
9. Spectral Efficiency Considerations for 6G: Targets and KPI Analysis. URL: <https://arxiv.org/abs/2508.09117>.
10. E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, H. Haas. Index modulation techniques for next-generation wireless networks // IEEE Access. 2017. Vol. 5. Pp. 16693–16746. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2737528.
11. M. Di Renzo, H. Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura, L. Hanzo. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation. Proc. // IEEE. 2013. Vol. 102. No. 1. Pp. 56–103. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2287851.
12. Солодовник В. І., Науменко М. І., Пилипенко М. Г. Оцінка ефективності методів просторової модуляції сигналів із різною кількістю активних передавальних антен // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку: збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції, 1 грудня 2022 р. Київ: ВІТІ ім. Героїв Крут, 2022. С. 198–199. URL: <https://mitit.mil.gov.ua/page/science>.
13. Солодовник В. І., Науменко М. І. Метод просторово-частотного блочного кодування сигналів з дворезимною індексною модуляцією піднесучих OFDM // Information Technology and Security. 2019. Vol. 7, iss. 2 (13). С. 216–229. DOI: 10.20535/2411-1031.2019.7.2.190572.
14. Li J., Li S., Dang S., Chen X., Chen C., Peng Y., Yu L. Generalized Polarization-Spatial Modulation With Multi-Mode Transmission // IEEE Internet of Things Journal. No. 12 (12). P. 18570–18581. DOI: 10.1109/IJOT.2025.3558310.
15. T. Mao, Z. Wang et al. New Constellation Design and Bit Mapping for Dual Mode OFDM-IM // IEEE Transactions on Communications. 2019. Vol. 67. No. 6. P. 3943–3955. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912704.

Надійшла до редколегії 23.04.2026.

Схвалена до друку 22.05.2026.

Дата публікації 29.05.2026.