

УДК 004.77

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.1.13>

Сергій ТИМЧУК

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних технологій,
Сумський державний університет, s.tymchuk@itp.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8600-4234

Ірина БАРАНОВА

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій,
Сумський державний університет, i.baranova@cs.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3767-8099

Олексій ПИСКАРЬОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин,
Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, oleksii.piskarov@nure.ua
ORCID: 0000-0002-6980-984X

Станіслав РАДЧЕНКО

асистент кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій,
Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, stanislav.radchenko@nure.ua
ORCID: 0000-0003-2520-6120

Тарас ЮРЧЕНКО

здобувач РВО магістр-науковець,
Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, taras.iurchenko@nure.ua
ORCID: 0009-0002-5535-6998

ПОЛІПШЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У WI-FI-МЕРЕЖАХ

Анотація. На теперішній час відбувається інтенсивний розвиток систем бездротового зв'язку, у тому числі комп'ютерних Wi-Fi мереж. У каналах радіозв'язку таких систем діє комплекс перешкод і спотворень. Для покращення таких параметрів як швидкодія та перешкодостійкість, особливо в умовах щільного використання достатньо обмеженого частотного каналу, існує необхідність вдосконалення існуючих методів, та створення принципово нових. **Метою статті** є огляд методів передачі інформації в сучасних системах бездротового доступу та дослідження алгоритмів підвищення пропускної здатності мережі за рахунок застосування методів адаптивної просторової обробки сигналів і пошук балансу між підвищенням пропускної здатності технології MIMO та зменшення ймовірності помилки на прийомі. **Методи дослідження:** під час дослідження використовуються методи передачі інформації в сучасних системах бездротового доступу та алгоритми підвищення пропускної здатності мережі. **Наукова новина** дослідження полягає в тому, що проведений аналіз сучасних методів бездротової передачі інформації, виявив, що просторово-часове кодування вдало поєднує переваги методів просторового рознесення з можливостями виправлення помилок коригувальним кодом при використанні оптимальних алгоритмів декодування, при цьому ефективність досліджень та розробок нових методів просторово-часового кодування значною мірою залежить від того, наскільки моделі каналів відповідають реальним умовам. Одним з перспективних методів підвищення параметрів якості мережі – є метод синтезу згортково-блокових сигнально-кодових конструкцій з використанням внутрішніх сигналів з класу просторово-часового блокового кодування й зовнішніх сигнальних конструкцій, який є ефективною технікою для зменшення впливу замирання на сигнали, поліпшення якості та пропускної спроможності системи Wi-Fi зв'язку. **Висновки.** Розробка цих алгоритмів та методів відкриває широкі перспективи для майбутнього розвитку бездротових комунікаційних систем. Однією з ключових перспектив є подальше вдосконалення методів адаптивної просторової обробки сигналів та оптимізація балансу між підвищенням пропускної здатності та зменшенням ймовірності помилок на прийомі. Додатково, можливості згортково-блокових сигнально-кодових конструкцій можуть бути розширені шляхом дослідження та впровадження нових технологій, наприклад, використання машинного навчання для оптимізації параметрів кодування та декодування сигналів. Також існують можливості застосування цих методів у високошвидкісних мережах мобільного зв'язку, таких як мережі п'ятого покоління (5G) і майбутні покоління, де висока пропускна здатність та ефективність передачі даних стають ключовими вимогами.

Ключові слова: Wi-Fi мережа, просторово-часове кодування, технологія MIMO, декодування Аламоуті, бінарна фазова маніпуляція

**Sergiy TYMCHUK, Iryna BARANOVA, Oleksiy PISKAROV, Stanislav RADCHENKO, Taras YURCHENKO.
IMPROVING NOISE IMMUNITY AND INCREASING DATA TRANSMISSION SPEED IN WI-FI NETWORKS**

Abstract. Wireless communication systems, including computer Wi-Fi networks, are currently undergoing intensive development. The radio communication channels of such systems are subject to a complex of interference and distortion. To improve such parameters as performance and interference resistance, especially in conditions of dense use of a rather limited frequency channel, there is a need to improve existing methods and create fundamentally new ones. **The purpose of the article** is to review the methods of information transmission in modern wireless access systems and to study algorithms for increasing network capacity by applying adaptive spatial signal processing methods and finding a balance between increasing the throughput of MIMO technology and reducing the probability of reception errors. **Research methods:** the study uses methods of information transmission in modern wireless access systems and algorithms for increasing network capacity. **The scientific novelty** of the study is that the analysis of modern methods of wireless information transmission revealed that space-time coding successfully combines the advantages of spatial diversity methods with the ability to correct errors with a corrective code when using optimal decoding algorithms, while the effectiveness of research and development of new methods of space-time coding largely depends on how well the channel models match real-world conditions. One of the promising methods for improving network quality parameters is the method of synthesizing convolutional-block signal-code structures using internal signals from the class of space-time block coding and external signal structures, which is an effective technique for reducing the effect of fading on signals, improving the quality and throughput of the Wi-Fi communication system. **Conclusions.** The development of these algorithms and methods opens up broad prospects for the future development of wireless communication systems. One of the key prospects is to further improve the methods of adaptive spatial signal processing and optimize the balance between increasing throughput and reducing the probability of reception errors. Additionally, the capabilities of convolutional-block signal-code designs can be expanded by researching and implementing new technologies, such as using machine learning to optimize signal coding and decoding parameters. There are also opportunities to apply these techniques to high-speed mobile networks, such as fifth generation (5G) and future generations, where high bandwidth and data efficiency are becoming key requirements.

Key words: Wi-Fi network, space-time coding, MIMO technology, Alamouti decoding, binary phase manipulation.

Вступ і постановка проблеми. На сьогодні спостерігається активний прогрес у розвитку бездротових комунікаційних систем, що охоплюють мобільний радіозв'язок, системи безпроводного доступу до Інтернету, бездротові комп'ютерні мережі, що функціонують всередині будівель та інші подібні технології. Канали радіозв'язку в таких системах піддаються впливу різноманітних перешкод і спотворень. Особливу увагу слід звернути на багатопроменевість, що виникає через відбиття радіохвиль на шляху їх поширення. У діапазоні коротких хвиль виникають повторні відбиття від неоднорідностей іоносфери. У метрових (дециметрових) діапазонах хвиль спостерігаються відбиття від будівель, нерівностей рельєфу (особливо при організації зв'язку на відкритих місцевостях) та відбиття від стін і конструкцій (зокрема під час зв'язку всередині будівель). Сильні завмирання сигналу у каналі створюють труднощі у визначенні переданих повідомлень та можуть спричинити спотворення переданої інформації [11].

Аналіз досліджень і публікацій. Вперше методи статистичної теорії зв'язку для рознесеного прийому були використані наприкінці 1930-х років, однак для розробки основних теоретичних концепцій статистичної теорії розподіленого прийому знадобилося ще 15-20 років. Ідея використання рознесеного прийому для подолання завмирань полягає в спільному прийомі кількох сигналів на приймачі, які несуть однакову інформацію, але були прийняті різними шляхами. Рознесення має застосовуватися таким чином, щоб імовірність одночасного завмирання сигналів у всіх каналах, що використовуються, була значно меншою, ніж у будь-якого окремого каналу.

Були розроблені методи комбінування сигналів із різних рознесених каналів з втратами [12]. Радикальним методом подолання завмирання радіосигналів є розподілення приймальних антен, а найефективнішим методом об'єднання є оптимальне "вагове" комбінування, яке базується на критерії максимального відношення сигналу до шуму. Ця комбінація (рознесення та оптимальна обробка на прийомі) стала настільки поширеною, що до приходу "нової ери" бездротового зв'язку вона була включена до арсеналу засобів, описаних у спеціалізованому посібнику з бездротового зв'язку [14].

Були спроби вирішити проблему завадостійкого передавання інформації каналами з втратами, "обходячи" традиційні методи рознесення. Одним із таких підходів є використання структурних властивостей переданих сигналів, наприклад, передача широкосмугових сигналів, які дозволяють розділяти промені на прийомі – це система RAKE [11].

Поява робіт, що реалізували ідею просторово-часового кодування (ПЧК), відзначила нову еру в теорії методів передавання інформації каналами із завмиранням. Зокрема в роботі [5] пропонується оточити джерело сигналу багатопроменевістю (середовище поширення радіосигналів) безліччю передавальних та приймальних антен і відповідно організувати передачу та обробку сигналів на прийомі.

У будь-яких теоретичних дослідженнях методів передавання інформації через специфічні канали ключовим є питання математичної моделі цього каналу [2]. Для теорії інформації, як науки про

телекомунікації, сьогодні важливо є те, що основні принципи К. Шеннона про пропускну здатність каналу можна застосовувати до нових моделей каналів. У [15] було розглянуто питання широкосмугових бездротових мереж передавання інформації з описом інженерних рішень. Передові ефективні методи передавання інформації каналами з втратами можуть бути представлені та проаналізовані як сигнально-кодові конструкції (СКК), де завадостійке кодування забезпечує наближення до пропускну здатності каналу, а сигнали використовуються для узгодження кодування з каналом.

Метою цієї роботи є огляд методів передачі інформації в сучасних системах бездротового доступу, а також дослідження алгоритмів підвищення пропускну здатності мережі шляхом застосування методів адаптивної просторової обробки сигналів і знаходження балансу між підвищенням пропускну здатності технології MIMO та зменшенням ймовірності помилки на прийомі.

Виклад основного матеріалу. Сучасні системи радіозв'язку відзначаються високими показниками пропускну здатності. Різке зростання класичної межі Шеннона для пропускну здатності систем зв'язку стало можливим завдяки впровадженню просторової обробки сигналів, або технології MIMO (Multiple Input-Multiple Output — множинний вхід-множинний вихід), яка використовує ефект множинного поширення, де передані сигнали відбиваються від різних об'єктів та перешкод, а приймальна антена приймає сигнали під різними кутами і в різний час. Застосування цієї технології дозволяє через рознесення сигналу при передачі та прийомі зменшити відсоток біт, що отримані з помилками, тим самим підвищуючи завадостійкість каналів зв'язку.

Методи передачі інформації в сучасних системах широкосмугового бездротового доступу ґрунтуються на використанні технології MIMO. Переваги та особливості цього методу були продемонстровані на лабораторному прототипі ще у 1998 році, і згодом він був включений до стандартів широкосмугового доступу IEEE 802.11n і IEEE 802.16e [9]. Основна ідея технології MIMO показана на рисунку 1.

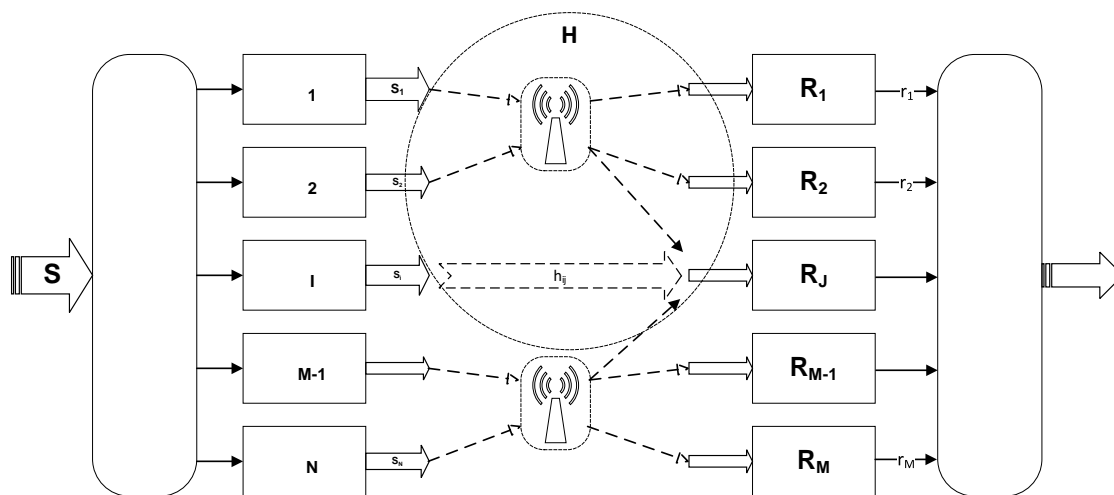


Рис. 1. Загальна структура роботи системи MIMO

Передавальна частина системи включає M передавачів ($T_1 \dots T_M$) із передавальними антенами, тоді як приймальна частина включає N приймачів і приймальних антен ($R_1 \dots R_N$). Вважається, що завмирання породжується розсіювальним середовищем H поширення радіосигналу. На рисунку 1 стрілками показано, що сигнал будь-якого з передавачів T_i може досягати входу будь-якого з приймачів ($R_1 \dots R_N$), зазнаючи завмирання. Функціонування системи забезпечується мультиплексором на передачі, демультіплексором на прийомі та приймачем максимальної правдоподібності на приймальній стороні.

Отже вноситься просторова надмірність, завдяки якій вдається «пронизувати» турбулентне середовище поширення радіосигналу та при цьому уникнути впливу завмирань при відповідній обробці прийнятої сукупності сигналів. Дана структура забезпечує передачу «від об'єму до об'єму» (from volume to volume). Це визначення підкреслює суттєву різницю між об'ємно-багатовимірною просторовою моделлю каналу та звичайною одновимірною моделлю, яка розглядається як проста лінія між передавачем та приймачем. Такі структури зазвичай позначають як MIMO ($N \times M$) (N – кількість передавальних антен, M – кількість приймальних антен).

При цьому можлива велика різноманітність варіантів систем. Можна визначити такі варіанти структури MIMO (2×2):

1. Структура MIMO (1x2), іменована як SIMO (Single Input-Multiple Output – один вхід-багато виходів). Традиційна система радіозв'язку з одним передавачем і двома рознесеними в просторі антенами і приймачами.

2. Структура MIMO (2x1), іменована як MISO (Multiple Input-Single Output – багато входів – один вихід).

Термін «просторово-часове кодування» (Space-Time Coding – STC) – в теорії інформації під заводостійким кодуванням прийнято розуміти процедуру, відповідно якої в передані повідомлення вноситься надмірність, яка дає можливість виправляти каналні помилки при адекватному декодуванні. Зазвичай у традиційних методах кодування для введення надмірності використовується часовий ресурс (введення додаткових символів при блоковому або згортковому кодуванні). При цьому платою за підвищення заводостійкості є зниження швидкості передачі інформації. У розглянутих на рис.1 багатантенних системах MIMO крім часового ресурсу (традиційне заводостійке кодування можливе також у будь-якому каналі " T_i-R_j ") виникає можливість використовувати просторовий ресурс та вирішувати завдання оптимального введення надмірності, тобто використовувати оптимальні методи ПЧК, для забезпечення якнайкращого обміну надмірності на заводостійкість.

При практичному застосуванні систем MIMO потрібно вирішувати питання організації мультиплексної передачі сигналів від передавальних антен до приймальних. В основному застосовують часовий поділ сигналів. Тобто організовується «кадр» передачі з усіма необхідними в таких випадках атрибутами кадрової синхронізації («синхрослово» тощо). Обираючи метод модуляції сигналів-переносників можна вирішити питання швидкості передачі інформації в системі загалом [23].

У переважній більшості методів ПЧК у каналах MIMO неодмінною умовою теоретичного аналізу є квазістаціонарність каналу в такій формі [14]:

- в структурі MIMO передачу інформації можливо організувати кадрами (frame), які періодично передаються і мають спеціальну структуру;
- при зміні місця розташування передавальних і приймальних антен коефіцієнти передачі змінюються;
- коефіцієнти передачі на інтервалах декількох (зазвичай двох) поряд розташованих символів залишаються незмінними. Пропонована при цьому структура кадру (рис. 2) може бути подібна до широко використовуваної форми кадру в стандарті США системи стільникового зв'язку IS-136 [4].

Навчальна послідовність	Дані	Пілот- сигнали	Дані	Пілот- сигнали	Дані	Пілот- сигнали	Дані
------------------------------------	------	-------------------	------	-------------------	------	-------------------	------

Рис. 2. Типова структура кадру просторово-часового кодування

Кадр включає в себе початкову навчальну (training) послідовність (НП) і періодично повторювані блоки переданих даних, які розділені пакетами пілот-сигналів (ПС). Структура НП може забезпечувати синхронізацію за кадрами. Використання пілот-сигналів ПС перед даними зумовлено необхідністю організації в демодуляторі когерентного прийому. Отже, увесь міжрядний простір передавальних і приймальних антен охоплено системою тимчасового мультиплексування, яка давно добре освоєна в системах стільникового мобільного зв'язку з часовим розподілом каналів TDMA.

Є дві групи методів ПЧК у каналах MIMO: просторово-часове решітчасте кодування (ПЧРК) та просторово-часове блокове кодування (ПЧБК).

Метод ПЧРК може поєднувати в собі переваги методів просторового різноманіття з можливістю виправлення помилок за допомогою виправлення коду та використовуючи оптимальні алгоритми декодування, які одночасно реалізують оптимальний алгоритм об'єднання сигналів різноманітності. Використовуючи традиційне коригувальне кодування додаючи при цьому надмірність у часовій області. У системах із ПЧРК вводиться надмірність також і в просторовій області, яка утворена кількома передавальними антенами й однією приймальною антеною (рис. 3). За рахунок ускладнення способів передачі і обробки сигналів на прийомі можливе отримання переваги у перешкодостійкості. Можна обрати для реалізації згортковий код зі швидкістю $R=k/n$. Кодер такого коду генерує послідовності, що утворюють кодову сітку, за допомогою якої алгоритм Вітербі в процесі декодування знаходить найбільш правдоподібний шлях.

На рисунку 3 показано модель системи з просторово-часовим решітчастим кодуванням, що містить кодер ПЧРК з n виходами, які під'єднані до n передавальних антен. Приймання виконується на одну

антену, приймач містить декодер просторово-часового коду. Зазначимо, що представлено систему типу MIMO ($n \times 1$), у якій обсяг рознесення $m=n$.

Приклади кодеру ПЧРК, конфігурації сигнального сузір'я восьмипозиційної фазової модуляції ФМ-8, і решітчастої діаграми коду показано на рисунку 4. На рис.4,а показано кодер згорткового коду з однічною пам'яттю [9], двома виходами ($n=2$) і погоджувальними многочленами $g_1=5$ та $g_2=1$ (D – символ затримки). Кодування виконується в алфавіті алгебраїчного кільця Z_8 (кільце цілих чисел з операціями додавання і множення за модулем 8). Під час синтезу такої сигнально-кодової конструкції широко застосовується ізоморфізм між символами алгебраїчного кільця Z_8 та сигналами фазової модуляції ФМ-8 [9]. Виходи кодера c_1 та c_2 під'єднано до відповідних входів передавачів рознесених передавальних антен. Для підвищення питомої швидкості передавання інформації в наведеному прикладі використовується фазова модуляція ФМ-8. Один крок решітчастої діаграми ПЧРК (рис. 4,в) включає набори попередніх і наступних станів кодеру (1...7) та гілок, які їх з'єднують.

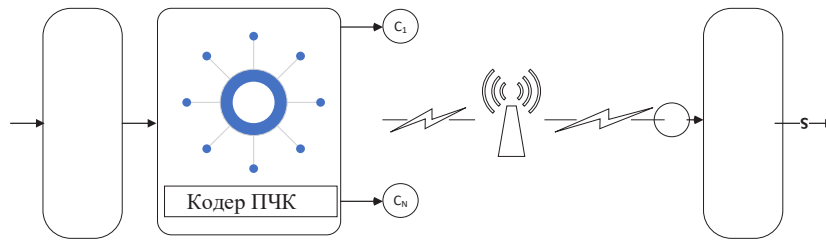


Рис. 3. Загальна модель роботи системи з просторово-часовим решітчастим кодуванням

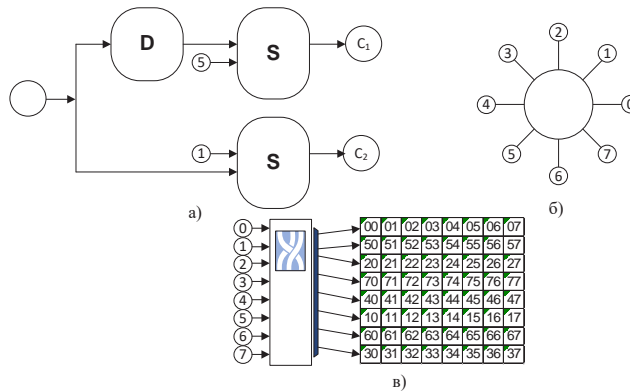


Рис. 4. Приклади кодеру ПЧРК: а - кодер, б - сигнальне сузір'я, в - решітчаста діаграма ПЧРК

Принцип ПЧРК наведено на рисунку 5 – представляє систему кодування в каналі MIMO (2×1), що містить дві передавальні антени та одну приймальну. Відповідно до [6] вхідний потік символів, що передаються, розбивається на пари (c_1, c_2): на першому напівтактовому інтервалі символ c_1 відправляється через антену T_1 , а символ c_2 – через антену T_2 . На другому напівтактовому інтервалі порядок передачі змінюється: через антену T_1 передається інверсія символу c_2 , а символ c_1 передається через антену T_2 . Блоковий код Alamouti – це розташування символів s у вигляді матриці (рис.5) в структурі кодера [6].

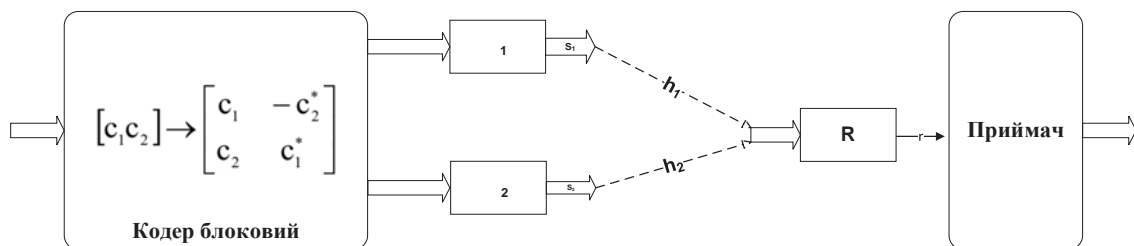


Рис. 5. Загальна модель роботи блокового кодування у каналі MIMO

Коефіцієнти передачі каналу на сусідніх інтервалах залишаються сталими. Теоретично завдання пошуку оптимальних блокових кодів просторово-часової обробки редукується до використання ортогональних матриць відповідних форматів.

З перших публікацій, які розкривають сутність та особливості просторово-часового кодування [4; 6; 17], розробники методів передавання інформації каналами з втратами швидко взяли методи ПЧК на озброєння, зважаючи на такі переваги [7]:

1. У просторово-часовому кодуванні для сигналів-переносників, на відміну від широкосмугових сигналів, не потрібно значного розширення смуги частот за умови збереження однакового рівня стійкості до завад. Ця перевага є критичною для операторів систем бездротового зв'язку в умовах зростаючого попиту на послуги бездротового зв'язку, де дефіцит спектра стає гострішим, а вартість виділення частотних смуг для бездротових систем постійно зростає.

2. Універсальність та гнучкість методів ПЧК [19] надають найкращі можливості для обміну енергоефективності на частотну ефективність у багатопромених каналах.

3. Можливість комбінування методів ПЧК разом з високошвидкісними сигналами цифрової модуляції гарантує високі показники частотної ефективності.

4. Можливість подальшого підвищення стійкості до перешкод у системах із ПЧК передбачається за умови впровадження адаптивного регулювання рівнів переданих сигналів.

5. Можливість вбудовування просторово-часових конструкцій у структуру сигналів у багатокористувацьких мережах.

Розглянемо алгоритми підвищення пропускної здатності мережі шляхом використання методів адаптивної просторової обробки сигналів та пошуку балансу між підвищенням пропускної здатності технології MIMO. Збільшення кількості незалежних радіоканалів призводить до зниження енергії на біт переданого повідомлення, що в свою чергу може підвищити ймовірність помилок на біт при прийнятті повідомлення.

Передбачається, що сигнали на передавальній стороні випромінюються одночасно та в одній смузі частот через M передавальних антен, а приймач має повну інформацію про характеристики каналу. Дані про параметри каналу передаються безпосередньо до пристрою декодування Аламоуті [4; 6], який витягує та інтерполює їх для отримання оцінки каналу для кожного переданого корисного символу. Під час моделювання, бінарний генератор Бернуллі створює випадковий двійковий сигнал, який подальше модулюється за допомогою різних методів: бінарна фазова маніпуляція (BPSK), квадратурна фазова маніпуляція (QPSK), 16-квадратурна амплітудна модуляція (16-QAM). Далі кодується кодером Аламоуті для передавання каналом MIMO з релеївськими завмираннями та адитивним білим шумом. Декодер Аламоуті [4; 6] об'єднує сигнали, отримані від приймальних антен, у єдиний потік для проведення демодуляції, а блок обчислення помилок порівнює демодульовані дані з вхідними.

Під час моделювання систем зв'язку (SISO – одна передавальна антена, одна приймальна антена; SIMO – одна передавальна антена, дві приймальні антени; MISO – дві передавальні антени, одна приймальна антена; MIMO 2×2 – дві передавальні антени, одна приймальна антена [22]; MIMO 2×2 – дві передавальні антени, дві приймальні антени; MIMO 4×4 – чотири передавальні антени, дві приймальні антени; MIMO 4×4 – чотири передавальні антени, чотири приймальні антени) всі вихідні параметри, такі як частота дискретизації, методи модуляції, швидкість передавання та ін., обрані в повній відповідності зі стандартом системи радіозв'язку IEEE 802.16e. Результати дослідження [18] відображено на рисунках 6, 7.

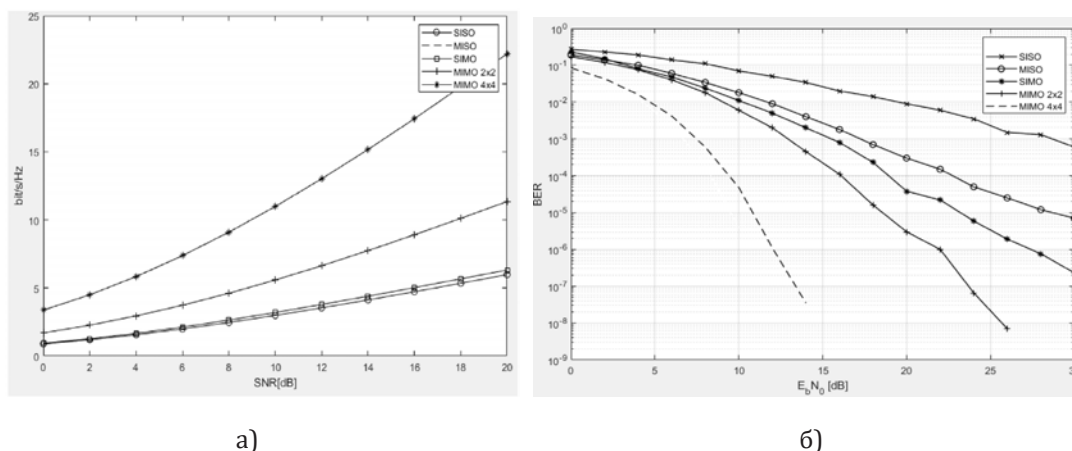


Рис. 6. Залежність пропускної здатності систем від відношення сигнал/шум (а) та імовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум для різних варіантів рознесення на прийомі та модуляція QPSK (б)

Видно, що в бездротових системах зв'язку швидкість передавання інформації помітно зростає лише зі збільшенням кількості передавальних і приймальних антен [13].

Для ймовірності помилки 10^{-4} виграш у завадостійкості на 3 дБ мають система SIMO над MISO, система MIMO 2×2 над SIMO. За тієї самої ймовірності помилки виграш у завадостійкості системи MIMO 4×4 над системою MIMO 2×2 збільшується в 2 рази і становить 6,5 дБ. Порівняння характеристик для варіантів з однією передавальною антеною і двома приймальними антенами (рознесення на прийомі) та з двома передавальними антенами та однією приймальною антеною (рознесення на передачі) свідчить, що рознесення на прийомі забезпечує додатковий виграш у 3 дБ. Також рознесення на прийомі та передачі дозволяє отримати додатковий виграш у 3 дБ порівняно з рознесенням на прийомі. Отже, зі збільшенням кількості антен на передачі та прийомі поліпшується захищеність від завад [8].

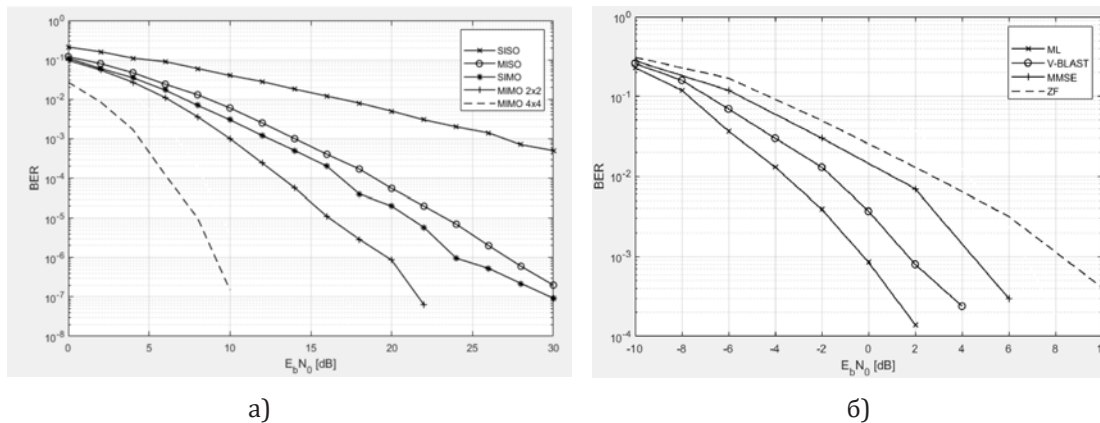


Рис. 7. Залежність імовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум для різних варіантів рознесення на прийомі та передачі (а) та імовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум за різними алгоритмами демодуляції (б)

Використовуючи модуляцію BPSK можна поліпшити завадостійкість. Для ймовірності помилки 10^{-4} SIMO виграє за завадостійкістю в системі MISO 3,2 дБ; система MIMO 2×2 виграє у SIMO 3,3 дБ; система MIMO 4×4 виграє у MIMO 2×2 7 дБ. Також додатковий виграш 3,2 дБ забезпечує рознесення на прийомі, рознесення на прийомі та передачі – 3,3 дБ, а збільшення кількості антен на передачі та на прийомі може поліпшити завадостійкість [20].

Алгоритми обробки сигналів у MIMO-системах без зворотного зв'язку відрізняються способом поділу переданих символів у приймальних антенах [14].

Основні з них [10; 24]: метод зведення до нуля (Zero Forcing (ZF)); оцінка за мінімумом середньоквадратичної помилки (МСКО-приймач); максимально правдоподібна (МП) оцінка прийнятих символів (МП-приймач); алгоритм BLAST (Bell Laboratories Layered Space-Time) просторового декодування, зокрема, вертикальний BLAST (V-BLAST).

Для ймовірності помилки 10^{-3} відношення сигнал/шум при демодуляції алгоритмом МП становить 0 дБ; алгоритмом V-BLAST – 1,8 дБ; алгоритмом МСКО – 4,5 дБ; алгоритмом ZF – 8,2 дБ. Алгоритм МП забезпечує найменше значення ймовірності помилки [1] порівняно з іншими, а відповідно, має найкращі властивості завадостійкості. Алгоритм МСКО не поступається в завадостійкості іншим і має меншу обчислювальну складність [21; 3].

Висновки. Після проведення досліджень можна зробити наступні висновки. Просторово-часове кодування успішно поєднує переваги методів просторового рознесення з можливостями виправлення помилок коригувальним кодом при застосуванні оптимальних алгоритмів декодування. Це реалізує одночасно оптимальний алгоритм об'єднання рознесених сигналів. Ефективність проведених досліджень та розроблених нових методів ПЧК для перспективних систем передачі даних значною мірою залежить від того, наскільки моделі каналів відповідають реальним умовам передачі. У статистичній теорії зв'язку широко та ефективно використовуються методи теорії інформації. Просторово-часові блокові коди надають значний виграш від рознесення за рахунок можливості забезпечення великого обсягу рознесення. Просторово-часові ґратчасті коди забезпечують значний енергетичний виграш у каналах із завмираннями завдяки кодуванню, проте мають обмежений виграш від рознесення через обмежений обсяг цього процесу.

Можливість подальшого підвищення завадостійкості решітчастих ПЧК стає можливою за умови використання як формувачів решітки кодерів сигнально-кодових конструкцій із нового перспективного

класу рекурсивних згорткових кодів [7]. Один з потенційно перспективних методів включає в себе синтез згортково-блокових сигнально-кодових конструкцій, де внутрішні сигнали використовуються з класу просторово-часових блокових кодів, а зовнішні – з кодів складної архітектури.

Застосування просторово-часового кодування в системах Wi-Fi зв'язку, підкріплене теоретичним аналізом та результатами моделювання, підтверджує його ефективність у зменшенні впливу завмирання на сигнали та покращенні якості і пропускної здатності. При використанні методів рознесення спостерігається покращення відношення сигнал/шум до десяти децибелів, що свідчить про перевагу цієї технології для систем зв'язку, які потребують підвищення пропускної здатності та ергодичної ємності, а також зменшення розмірів кінцевих пристроїв. Ефективність поліпшення відношення сигнал/шум виявляється при збільшенні кількості антен з однієї до двох як на передавальній, так і на приймальній стороні.

Список використаних джерел:

1. Губарев В.Ф., Романенко В.Д. Етапи та основні завдання столітньої теорії контролю і розробка системи ідентифікації. Частина 3. Проблема ідентифікації складних систем за неточними даними. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*. 69, 1 (Груд 2023), 5–23. DOI: 10.34229/1028-0979-2024-1-1.
2. Іщенко М.О. Сигнально-кодові конструкції для систем безпроводового зв'язку з просторово-часовим кодуванням: Автореф. дис. к.т.н. / ОНАЗ. – Одеса, 2009. 150 с.
3. Могилевич Д., Погребняк Л. Аналітична модель OFDM-MIMO сигналу у нестационарних каналах зв'язку із завмираннями. *Collection "Information Technology and Security"*. Vol. 11. Iss. 1 (20) (Jun. 2023), 39–46. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283538.
4. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE J. Select. Areas Communication*. –Vol. 16. No. 8.– 1998. – P. 1451–1458.
5. Banket V.L. Downlink Processing Algorithms for Multi-Antenna Wireless Communications. *IEEE Communications Magazine*. – 2005. No.1 P. 45–48.
6. Calderbank A.R. Space-Time Block Coding from Orthogonal Designs. *IEEE Trans. on Inform. Theory*. – 1999. – Vol. 45. – No. 5. P. 1456–1467.
7. Calderbank A.R. Space-time coding and signal processing for high data rate wireless communications. *Wireless, Communications and Mobile Computing*. – 2001. – No.1. P. 13–34.
8. Duman T.M., Ghayeb A. Coding for MIMO Communication Systems. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2007. 338 p.
9. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications. *IEEE Tech.Report*, IEEE 802.16 Work Group, 2001.
10. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications. *Revised Version of the document IEEE 802.16.3c-01/29r4. IEEE Tech.Report*, IEEE 802.16 Work Group, 2003.
11. Feher K. Wireless digital communications. New Jersey: Prentice-Hall PTR. 1999. 520 p.
12. Foschini G. Layered space – time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas. *Bell Laboratories Technical Journal*. – 1996. – Vol. 4, Autum. P. 41–59.
13. George T. MIMO System Technology for Wireless Communications. – CRC Press, USA, 2006.
14. Gesbert D. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space – Time Coded Wireless Systems. *IEEE Journal on selected areas in communications*. – 2003.– Vol. SAC – 21, No.3. P. 281–302.
15. History of MIMO in radiocommunications. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
17. Hohwald B., Marzetta T. Systematic Design of Unitary Space – Time Constellations. *IEEE Trans. on Inform. Theory*. – 2000. – Vol. 46. – No. 6. P. 1962–1973.
18. Jankiraman M. Space-time codes and MIMO systems. – Artech House, 2004. P. 344.
19. Lau B. K., Ow S. M. S., Kristensson G., Molisch A. F. Capacity Analysis for Compact MIMO Systems. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) (ISSN: 1550-2251)*. – IEEE Xplore, 2005. – Vol. 1. P. 165–170.
20. Lee S.J. et al. A Space-Time Code with full Diversity and Rate 2 for 2 Transmit Antenna Transmission. *IEEE C802.16e-04/434r2*, 2004.
21. Mohammed M. A., Vodichev V. Modeling of MIMO systems with universal controller. *Electrotechnic and Computer Systems*. 37 (113) (Sep. 2023), 26–32. DOI: 10.15276/eltecs.37.113.2023.03.
22. Shcherbina A.A. Effect of antenna mutual coupling on MIMO channel capacity. *IX International Conference on Antenna Theory and Tech-niques (ICATT-2013)*, Odesa, Ukraine 16-20 September 2013, p. 178–180.
23. Wang D. Super-Orthogonal Differential Trellis Coding and Decoding. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* – 2003 – Vol. 23, No.9. P. 1768–1798.
24. WLAN Tests: According to Standard IEEE 802.11a/b/g. Rohde & Schwarz GmbH & Co. K URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma69/1MA69_2e.pdf.