

Мацкевич Владислав Вікторович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0009-0005-6734-905X

Брезицький Сергій Миколайович*Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ*

ORCID 0009-0004-2562-890X

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ У МІМО СИСТЕМАХ

Анотація: Стаття присвячена аналізу і розробці методів обробки сигналів у системах зв'язку з використанням технології рознесених передавальних і приймальних антен (Multiple Input Multiple Output, МІМО), що є основою сучасних безпроводових стандартів зв'язку, таких як 4G, 5G, Wi-Fi та супутниковий зв'язок. Завдяки можливості одночасної передачі та прийому декількох потоків даних, МІМО-технології значно підвищують пропускну здатність і надійність зв'язку. У роботі детально розглянуто просторово-часові блокові коди (Space-Time Block Codes, STBC), які використовуються для забезпечення стійкості системи до завад і втрат даних під впливом багатопроменевих і швидкозмінних каналів. Також у статті досліджено методи детекції сигналів, включно з алгоритмами Zero Forcing (ZF) та Minimum Mean Square Error (MMSE), які є популярними інструментами для мінімізації впливу інтерференції та підвищення якості прийому. Показано, що кожен із методів має свої переваги та обмеження залежно від умов каналу та характеристик сигналу. Окремо розглянуто STBC-кодування, що забезпечує високу надійність передачі даних навіть за наявності значного рівня шуму та інтерференції, що особливо важливо для мобільних і високошвидкісних систем зв'язку. Основні результати роботи полягають у розробці адаптивних алгоритмів обробки сигналів, які забезпечують підвищення продуктивності систем зв'язку. Встановлено, що використання адаптивних підходів дає змогу значно зменшити енергоспоживання, одночасно забезпечуючи високу швидкість передачі даних та стійкість до перешкод. Дослідження показало, що комбінування методів детекції з просторово-часовим кодуванням покращує ефективність МІМО-систем у складних умовах середовища. Перспективи подальших досліджень спрямовані на оптимізацію та впровадження новітніх алгоритмів обробки сигналів, які забезпечуватимуть високу ефективність МІМО-систем у швидкозмінних каналах і за умов обмежених енергетичних ресурсів.

Ключові слова: МІМО, рознесені антени, просторово-часові блокові коди (STBC), обробка сигналів, детекція сигналів, Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE), алгоритми, безпроводові комунікаційні системи, надійність передачі даних, інтерференція, шум, адаптивні алгоритми, продуктивність систем зв'язку, 4G, 5G, Wi-Fi, супутниковий зв'язок, оптимізація.

Matskevych Vladyslav*State University of Information and Communication Technologies, Kyiv*

ORCID 0009-0005-6734-905X

Brezitskiy Serhii*State University of Information and Communication Technology, Kyiv.*

ORCID 0009-0004-2562-890X

RESEARCH OF SIGNAL PROCESSING METHODS IN MIMO SYSTEMS

Abstract: The article is devoted to the analysis and development of signal processing methods in communication systems using the technology of distributed transmitting and receiving antennas (Multiple Input Multiple Output, MIMO), which is the basis of modern wireless communication standards, such as 4G,

5G, Wi-Fi and satellite communication. Due to the possibility of simultaneous transmission and reception of several data streams, MIMO technologies significantly increase the bandwidth and reliability of communication. Space-Time Block Codes (STBC), which are used to ensure system resistance to interference and data loss under the influence of multipath and fast-changing channels, are considered in detail in the paper. The article also explores signal detection methods, including Zero Forcing (ZF) and Minimum Mean Square Error (MMSE) algorithms, which are popular tools for minimizing the impact of interference and improving reception quality. It is shown that each of the methods has its advantages and limitations depending on the channel conditions and signal characteristics. STBC coding is considered separately, which ensures high reliability of data transmission even in the presence of a significant level of noise and interference, which is especially important for mobile and high-speed communication systems. The main results of the work consist in the development of adaptive algorithms for signal processing, which ensure an increase in the productivity of communication systems. The use of adaptive approaches has been found to significantly reduce power consumption while providing high data rates and immunity to interference. The study showed that combining detection methods with spatio-temporal coding improves the efficiency of MIMO systems in complex environmental conditions. Prospects for further research are aimed at optimization and implementation of the latest signal processing algorithms, which will ensure high efficiency of MIMO systems in fast-changing channels and under conditions of limited energy resources.

Keywords: MIMO, spaced antennas, space-time block codes (STBC), signal processing, signal detection, Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE), algorithms, wireless communication systems, data transmission reliability, interference, noise, adaptive algorithms, communication system performance, 4G, 5G, Wi-Fi, satellite communications, optimization.

1. Вступ. З розвитком безпроводових технологій зв'язку та зростанням потреб у високошвидкісній передачі даних питання ефективного використання частотного спектру та покращення якості зв'язку стають все більш актуальними. Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка використовує кілька антен на передавальній і приймальній сторонах, є одним з найперспективніших рішень для вирішення цих викликів. Завдяки можливості передачі декількох потоків інформації одночасно, MIMO системи забезпечують суттєве збільшення пропускної здатності без необхідності розширення частотного ресурсу, що є особливо важливим для мобільних мереж наступних поколінь, таких як 4G, 5G та Wi-Fi стандартів нового покоління.

Методи обробки сигналів у MIMO системах є ключовим аспектом для реалізації потенціалу цієї технології. Ефективні алгоритми обробки дозволяють не лише покращити якість передачі даних, але й мінімізувати вплив інтерференції та шумів, що виникають у реальних каналах зв'язку. Особлива увага приділяється таким методам, як просторове мультиплексування, просторово-часове кодування, beamforming (формування променів) та методам об'єднання сигналів на приймальній стороні.

У цьому контексті дослідження сучасних методів обробки сигналів є необхідним для подальшого вдосконалення MIMO систем і забезпечення високої ефективності безпроводових мереж в умовах зростаючих вимог до якості та швидкості передачі даних.

2. Постановка проблеми. З розвитком безпроводових комунікацій виникає дедалі більша потреба у підвищенні пропускної здатності та надійності систем зв'язку, особливо у середовищах із високим рівнем інтерференції та багатопроменевого розповсюдження сигналу. Технологія MIMO, яка використовує кілька антен на передавачі та приймачі, відкриває нові можливості для підвищення ефективності передачі даних без необхідності збільшення ширини частотного спектра. Однак її реалізація вимагає розробки та оптимізації методів обробки сигналів, які могли б забезпечити максимальну продуктивність у реальних умовах роботи.

Основною проблемою є те, що в реальних каналах зв'язку сигнали піддаються різним впливам, таким як шум, загасання, інтерференція між користувачами та відбиття сигналів. Ці фактори можуть призводити до значних втрат інформації та погіршення якості зв'язку. Методи обробки сигналів у MIMO системах повинні ефективно враховувати ці виклики, забезпечуючи

високу швидкість передачі даних, мінімізацію помилок та адаптивність до мінливих умов каналу.

Крім того, сучасні MIMO системи стикаються з проблемами енергоефективності, що є особливо критичним для мобільних пристроїв, і складністю алгоритмів, які впливають на реальні витрати обчислювальних ресурсів. Отже, необхідно розробляти нові або вдосконалювати існуючі методи обробки сигналів, які могли б покращити продуктивність MIMO систем без значного збільшення складності та енергоспоживання.

Таким чином, проблема полягає в розробці та оптимізації методів обробки сигналів для MIMO систем, які б забезпечували максимальну ефективність у складних умовах зв'язку та задовольняли вимоги до швидкості, надійності та енергоефективності.

3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження в області MIMO систем зосереджені на підвищенні їхньої ефективності через нові алгоритми обробки сигналів. Значна увага приділяється просторовому мультиплексуванню та просторово-часовому кодуванню, що дозволяють передавати кілька потоків даних одночасно. Алгоритми на кшталт V-BLAST та Alamouti широко використовуються в стандартах LTE та 5G.

Іншим важливим напрямком є beamforming, що мінімізує інтерференцію за допомогою просторового спрямування сигналу. Дослідження в області енергоефективності також є ключовими, особливо для мобільних пристроїв, де важливо знижувати обчислювальні витрати.

Зростає інтерес до використання машинного навчання для оптимізації обробки сигналів, прогнозування змін у каналі зв'язку та покращення продуктивності систем у реальному часі. Крім того, дослідження у сфері когнітивних радіосистем у поєднанні з MIMO показують великий потенціал для адаптивного керування спектральними ресурсами в складних мережах.

4. **Мета і задачі досліджень.** Метою дослідження є аналіз існуючих методів обробки сигналів у системах MIMO для виявлення їхньої ефективності в умовах реальних каналів зв'язку, а також визначення напрямків для подальшого вдосконалення з метою підвищення швидкості передачі даних, надійності та енергоефективності.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати наявні методи обробки сигналів у MIMO системах.
- Виявити переваги та недоліки цих методів у реальних умовах зв'язку.
- Визначити можливості для покращення швидкості передачі даних та енергоефективності.

5. **Технологія MIMO.** Технологія множинних входів і виходів (MIMO) широко застосовується в стільникових мережах і надає низку переваг з точки зору продуктивності системи. Однією з головних переваг MIMO є підвищення ефективності за рахунок використання кількох антен як на передавачі, так і на приймачі. Завдяки цьому технологія може компенсувати вплив багатопроменевого затухання, що зменшує вплив різних видів замирань сигналу. Оскільки різні шляхи сигналу проходять через різні каналні умови, MIMO використовує цю розмаїтість для покращення якості зв'язку. Окрім цього, MIMO забезпечує вигоду завдяки просторовій концентрації радіохвиль, що дозволяє спрямовувати енергію сигналу в потрібному напрямку, покращуючи зону покриття та якість обслуговування.

Технологія також дозволяє отримати вигоду за рахунок коефіцієнта мультиплексування. Використовуючи кілька антен, MIMO може одночасно передавати незалежні сигнали, що підвищує спектральну ефективність і дозволяє передавати більше інформації за одиницю часу. Однак, між різними методами застосування MIMO існує компроміс. Залежно від умов каналу, трафіку та доступних ресурсів, оптимальна стратегія використання MIMO може змінюватись. Наприклад, за умов сильного багатопроменевого затухання та низького рівня шуму, технологія може суттєво покращити надійність зв'язку.

З іншого боку, якщо затухання незначне, а рівень шуму високий, виграш від мультиплексування стає більш важливим, що дозволяє підвищити спектральну ефективність і передавати більше незалежних сигналів. Крім того, кількість доступних антен, ширина смуги частот та потужність передавача також можуть впливати на вибір оптимальної конфігурації MIMO. У випадку обмежених ресурсів, може виникнути потреба зменшити кількість активних антен або налаштувати інші параметри системи для досягнення балансу між продуктивністю та ресурсами. Таким чином, для максимізації переваг MIMO у стільникових системах необхідно враховувати фактори, як-от канальні умови, трафік та доступні ресурси, щоб забезпечити найвищу ефективність передачі даних.

6. Методи обробки сигналів у системах MIMO

6.1 Просторова мультиплексія (Spatial Multiplexing)

Просторова мультиплексія (Spatial Multiplexing, SM) — це технологія, яка дозволяє системам MIMO значно збільшувати пропускну здатність без розширення смуги пропускання. Вона передбачає одночасну передачу кількох незалежних потоків даних через різні передавальні та приймальні антени, що ефективно використовує наявний спектр і збільшує швидкість передачі.

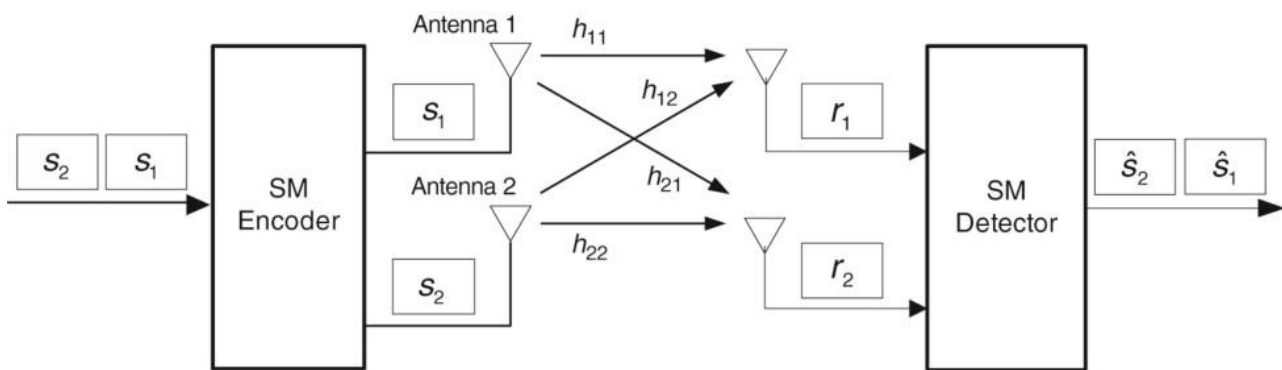


Рис. 1. Просторова мультиплексія [1]

Основні принципи

У просторовій мультиплексії сигнал ділиться на NN потоків (де NN — кількість антен), кожен з яких передається через окремі антени. Потoki проходять різними шляхами в середовищі передачі, створюючи незалежні канали. Приймач декодує сигнали, використовуючи інформацію про стан каналу (CSI — Channel State Information).

Математична модель

Модель системи MIMO для просторової мультиплексії можна описати так:

$$y = Hx + n \quad (1)$$

де y — вектор прийнятих сигналів, H — матриця каналу, x — вектор переданих сигналів, n — вектор шумів.

Пропускна здатність системи MIMO з просторовою мультиплексією можна оцінити через власні числа матриці каналу HH^H :

$$C = \sum_{i=1}^{\min(N_t, N_r)} \log_2(1 + \lambda_i * SNR) \quad (2)$$

де λ_i — це власні числа матриці HH^H , а SNR — співвідношення сигнал/шум

Застосування:

Просторова мультиплексія використовується для збільшення швидкості передачі даних. У LTE та Wi-Fi цей метод дає змогу передавати кілька потоків даних одночасно за допомогою кількох антен. Наприклад, у Wi-Fi стандарту 802.11ac можна передавати до 8 потоків даних, що збільшує пропускну здатність мережі.

6.2 Комбінування просторової диверсифікації (Spatial Diversity)

Просторова диверсифікація (Spatial Diversity) — це метод, який підвищує надійність безпроводового зв'язку за допомогою використання кількох антен для передавання або приймання одного і того ж сигналу. Головна ідея полягає в тому, що сигнали з різних антен

проходять різні просторові шляхи, що дозволяє зменшити ефект багатопроменевого затухання та покращити якість зв'язку.

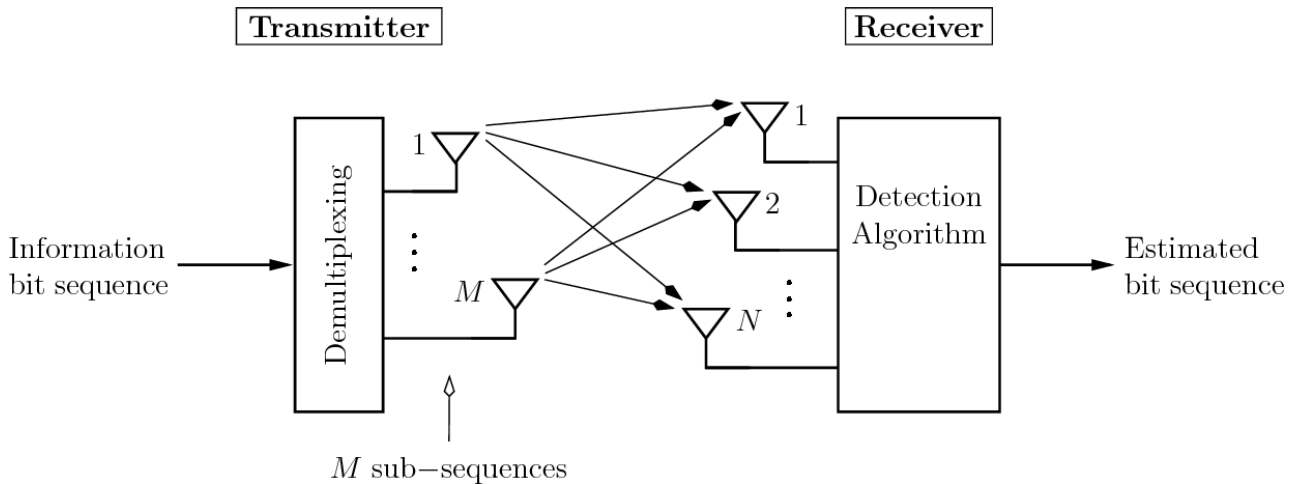


Рис. 2. Просторова диверсифікація [2]

Принцип роботи

Суть просторової диверсифікації полягає в передачі або прийомі кількох копій одного сигналу через просторово рознесені антени. Оскільки шляхи затухання сигналів відрізняються, це дає змогу уникнути одночасного згасання сигналу на всіх каналах і покращує стабільність передачі.

Основні види:

1. Диверсифікація за передаванням (Transmit Diversity): Використовує кілька антен для передавання того ж сигналу. Поширений метод — Алгоритм Алламуті.
2. Диверсифікація за прийомом (Receive Diversity): Кілька антен на приймачі отримують один сигнал, що дозволяє вибрати найкращий сигнал або їх комбінувати.
3. Просторово-часова диверсифікація (STBC): Комбінує сигнали в просторі та часі для досягнення диверсифікації. Наприклад, STBC Алламуті використовує дві антени для передавання кодованого сигналу.

Формули

1. Середня потужність сигналу при N антенах:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_N \quad (3)$$

де P_1, P_2, P_N – потужності сигналу, отримані від кожної з антен

2. Алгоритм Алламуті для двох антен:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

де x_1, x_2 — символи, що передаються, а x_1^* і $-x_2^*$ — їхні комплексні спряження

Застосування:

Просторова диверсифікація підвищує надійність передачі, зменшуючи інтерференцію та багатопроменевість. У LTE використовується Alamouti код для передачі одного потоку двома передавачами, що покращує прийом. Також застосовується у Wi-Fi для покращення сигналу.

6.3 Масивний MIMO (Massive MIMO)

Масивний MIMO – це технологія, яка використовує велику кількість антен на базовій станції для одночасного обслуговування багатьох користувачів, підвищуючи пропускну здатність та енергоефективність безпроводових мереж. Вона є ключовою для 5G.

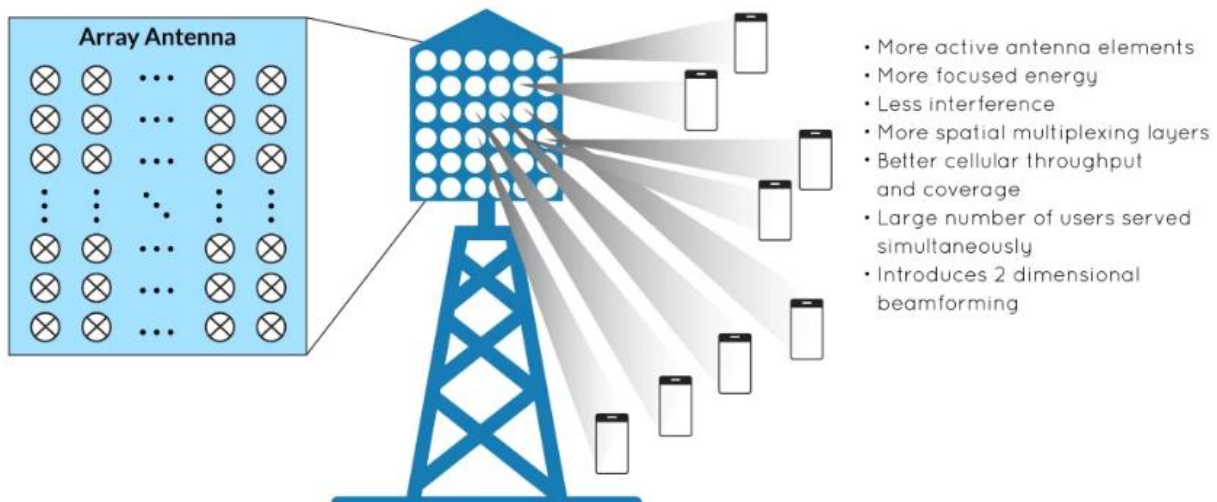


Рис. 3. Масивний MIMO [3]

Основні принципи:

На відміну від звичайного MIMO, масивний MIMO застосовує десятки або сотні антен для передачі сигналів на безліч користувачів одночасно, використовуючи алгоритми формування променів і обробки сигналів для зниження перешкод між користувачами.

Основні формули:

1. Модель сигналу:

$$y = Hx + n \quad (5)$$

де y — вектор прийнятих сигналів, H — матриця каналу, x — вектор переданих сигналів, n — вектор шумів.

2. Пропускна здатність:

$$C = M * \log_2 \left(1 + \text{SNR} * \frac{1}{M} \right) \quad (6)$$

де C — пропускна здатність, M — кількість антен, SNR — відношення сигнал/шум.

1. Антенно-решітковий гейн:

$$C = 10 \log_{10}(M) \quad (7)$$

де M — кількість антен, що підвищує направленість сигналу і його енергоефективність.

Застосування:

Масивний MIMO є ключовою технологією в 5G, де використовується велика кількість антен для одночасної обробки кількох сигналів від різних користувачів. Це дозволяє значно збільшити пропускну здатність і спектральну ефективність. Масивний MIMO також дозволяє використовувати різні потоки для різних користувачів одночасно (мульти-користувацький MIMO).

6.4 Алгоритми формування променя (Beamforming)

Формування променя (Beamforming) — це технологія, що дозволяє спрямовувати радіосигнал у певний напрямок, використовуючи масив антен. Цей підхід покращує якість зв'язку, знижує перешкоди та підвищує ефективність систем, таких як MIMO та Massive MIMO.

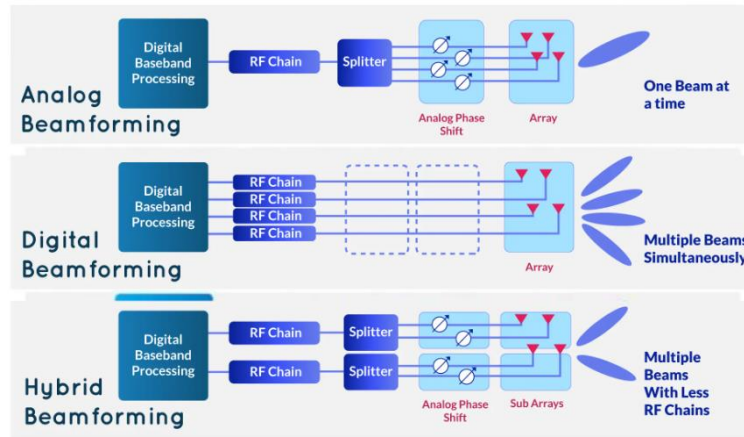


Рис. 4. Beamforming [4]

Принцип роботи

Beamforming реалізується за допомогою зміни фаз і амплітуд сигналів на кожній антені. Це дозволяє концентрувати енергію в напрямку користувача, зменшуючи перешкоди в інших напрямках.

Типи:

1. Фіксоване: Промені спрямовані в заданих напрямках, незалежно від руху користувача.
2. Адаптивне: Промінь налаштовується автоматично залежно від позиції користувача.

Основна формула:

Фаза сигналу для кожної антени визначається за формулою:

$$\phi_n = -\frac{2\pi d}{\lambda}(n-1)\sin(\theta) \tag{8}$$

де d — відстань між антенами, λ — довжина хвилі, n — номер антени.

Застосування:

У 5G використовується формування променя для направлення сигналу безпосередньо на користувача, що зменшує втрати потужності та інтерференцію. Наприклад, у високочастотних діапазонах 5G mmWave антени формують вузькі промені для покращення передачі на великі відстані. Wi-Fi 802.11ac і 802.11ax використовують формування променя для підвищення сигналу до конкретних пристроїв у мережі.

6.5 Попереднє кодування (Pre-coding)

Попереднє кодування (Precoding) — це метод обробки сигналів у системах MIMO для оптимізації передачі даних, мінімізації інтерференції між потоками і покращення якості зв'язку. Використовується в MIMO та Massive MIMO системах, де є кілька антен на передавачі та приймачі.

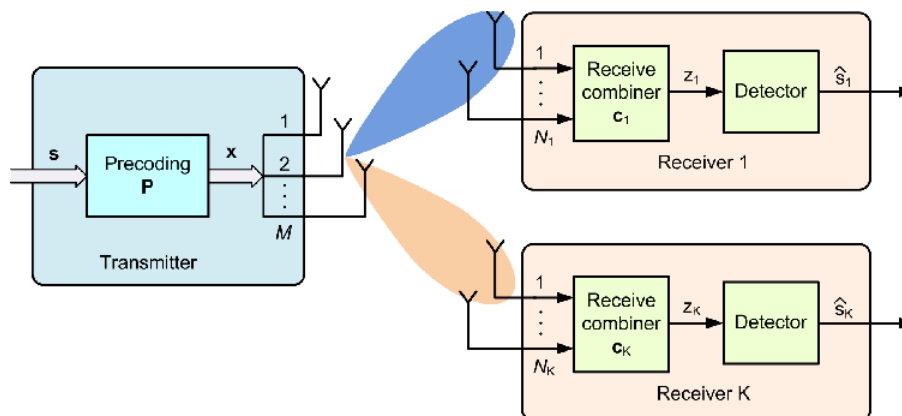


Рис. 5. Попереднє кодування [5]

Основні принципи:

Попереднє кодування на передавачі коригує фазу та амплітуду сигналів для оптимальної передачі через канал, використовуючи інформацію про стан каналу (з каналного зворотного зв'язку). Це мінімізує інтерференцію між потоками і підвищує ефективність системи.

Типи:

1. Лінійне попереднє кодування: Простий метод, що використовує знання каналу для налаштування сигналів.
2. Zero-Forcing Precoding: Видаляє інтерференцію між потоками, але може знизити енергоефективність.
3. SVD попереднє кодування: Використовує сингулярний розклад для передавання незалежних потоків сигналів, покращуючи спектральну ефективність.

Застосування:

Попереднє кодування використовується для адаптації переданого сигналу до умов каналу між передавачем і приймачем. У системах LTE та 5G попереднє кодування дозволяє передавати кілька потоків даних з максимальною ефективністю, застосовуючи матрицю перед кодуванням, яка оптимізує передачу в умовах різних інтерференцій та згукань.

6.6 Метод детекції сигналів (Signal Detection)

Метод детекції сигналів — ключовий етап в обробці сигналів у безпроводових системах, таких як MIMO. Його завдання — ідентифікувати передані сигнали, враховуючи шум та інтерференцію, що істотно впливає на якість зв'язку.

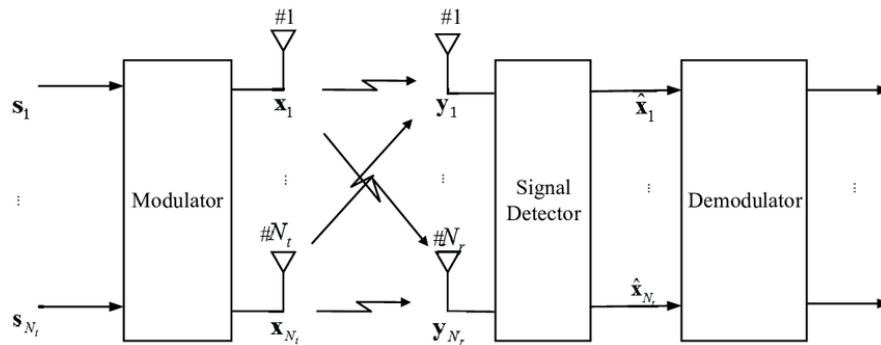


Рис. 6. Метод детекції сигналів [6]

Основні принципи:

Детекція передбачає аналіз прийнятих сигналів і їх порівняння з можливими варіантами переданих даних. У MIMO-системах цей процес ускладнюється через велику кількість антен і сигналів.

Основні етапи:

1. Попередня обробка сигналу: Враховує каналні ефекти.
2. Оцінка каналу: Оцінює, як сигнал змінюється під впливом каналу.
3. Детекція: Використання алгоритмів, таких як максимальне правдоподібне оцінювання (MLE), для визначення переданих символів.

Алгоритми детекції:

1. Zero-Forcing (ZF): Усунення інтерференції шляхом проєктування сигналу на простір переданих символів.
2. MMSE (Minimum Mean Square Error): Мінімізує середнє квадратичне відхилення і знижує вплив шуму.

Застосування:

У реальних системах LTE і 5G застосовуються різні методи детекції сигналів для відновлення переданих даних із множини антен, наприклад, Zero-Forcing (ZF) або MMSE (Minimum Mean Square Error) детектори. Вони допомагають відновити сигнали, ослаблені або з інтерференціями від інших користувачів.

6.7 Кодування за допомогою просторово-часових блокових кодів (Space-Time Block Coding, STBC)

Просторово-часове блокове кодування (STBC) — це метод, що підвищує надійність передачі даних у безпроводових системах, таких як MIMO, за рахунок використання кількох антен і часових інтервалів.

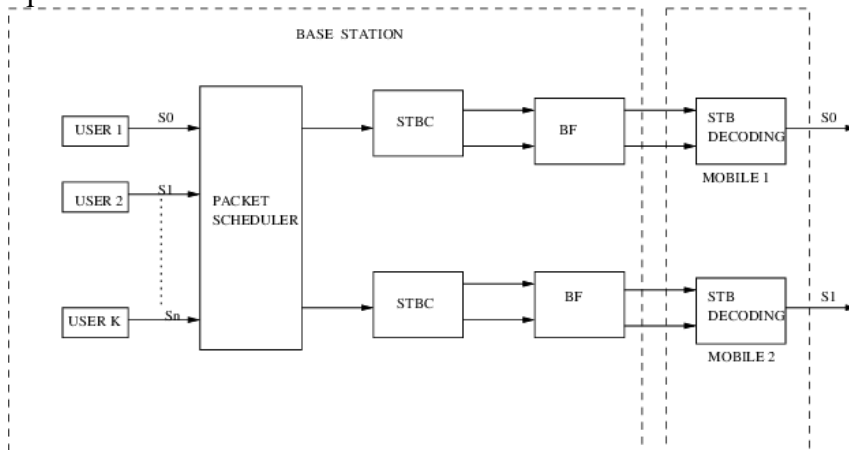


Рис. 6. SBTS [7]

Таблиця 1

Переваги та недоліки методів

Метод	Переваги	Недоліки
Просторова мультиплексія (Spatial Multiplexing)	<ul style="list-style-type: none"> - Підвищення пропускної здатності - Ефективність використання спектру 	<ul style="list-style-type: none"> - Інтерференція між потоками - Якість каналу
Комбінування просторової диверсифікація (Spatial Diversity)	<ul style="list-style-type: none"> - Надійність - Покращення якості 	<ul style="list-style-type: none"> - Додаткові ресурси
Масивний MIMO (Massive MIMO)	<ul style="list-style-type: none"> - Підвищена пропускна здатність - Висока енергоефективність - Зниження перешкод між користувачами за рахунок спрямованих променів 	<ul style="list-style-type: none"> - Великі обчислювальні витрати - Калібрування антен
Алгоритми формування променя (Beamforming)	<ul style="list-style-type: none"> - Покращена якість зв'язку. - Зменшення інтерференції. - Оптимальне використання спектру. 	<ul style="list-style-type: none"> - Складні алгоритми для адаптивного управління. - Високі вимоги до синхронізації антен.
Попереднє кодування (Pre-coding)	<ul style="list-style-type: none"> - Зниження інтерференції. - Підвищення пропускної здатності. - Оптимізація енергоспоживання. 	<ul style="list-style-type: none"> - Вимагає точного зворотного зв'язку і складної реалізації.
Метод детекції сигналів (Signal Detection)	<ul style="list-style-type: none"> - Підвищення якості зв'язку. - Адаптація до змін каналу. 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока обчислювальна складність і чутливість до шуму.
Кодування за допомогою просторово-часових блокових кодів (Space-Time Block Coding, STBC)	<ul style="list-style-type: none"> - Стійкість до помилок у складних каналах. - Збільшена пропускна здатність без збільшення потужності. - Гнучкість до зміни умов каналу. 	<ul style="list-style-type: none"> - Високі обчислювальні вимоги. - Потреба в достатній кількості антен.

Основні принципи STBC:

STBC кодує інформацію в блоки, які передаються через кілька антен у різні моменти часу. Це допомагає зменшити вплив згасання та шуму, підвищуючи стійкість до помилок.

Модель сигналу:

Сигнали передаються через кілька антен, приймаються з урахуванням шуму та інтерференції:

$$y = Hx + n$$

де y — вектор прийнятих сигналів, H — матриця каналу, x — передані символи, n — шум.

Приклад: Код Альям-Вейнера (Alamouti Code)

У системі з 2 антенами символи передаються через обидві антени за два часові інтервали. Це підвищує стійкість до згасання, забезпечуючи ефективне кодування та відновлення сигналів.

Застосування:

STBC використовується для забезпечення надійної передачі в умовах багатопроменевості. У Wi-Fi 802.11n STBC забезпечує покращену передачу даних, знижуючи ймовірність помилок при передачі через кілька антен, що особливо корисно в умовах слабого сигналу або шуму.

7. Основні напрямки розвитку MIMO-систем у 6G

Штучний інтелект та машинне навчання для MIMO

Одним із ключових напрямків розвитку MIMO в 6G є інтеграція штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) для автоматизації та оптимізації обробки сигналів. AI може бути використаний для:

- Оптимізації розподілу ресурсів між різними антенами й користувачами, підвищуючи ефективність спектра та потужності.
- Адаптації системи до мінливих умов середовища, наприклад, для реального часу налаштування напрямків променів у системах Beamforming.
- Покращення алгоритмів детекції сигналів, особливо в умовах сильного шуму або багатопроменевих середовищ.

Завдяки AI, 6G зможе обробляти великі масиви даних і виконувати оптимальні рішення для багатокористувацьких сценаріїв, роблячи MIMO-системи більш гнучкими та адаптивними.

Терагерцеві частоти та ультрамасивний MIMO (Ultra Massive MIMO)

В 6G передбачене використання терагерцевих частот (від 100 ГГц до 3 ТГц), що забезпечить неймовірно високу пропускну здатність. Однак через більші втрати сигналу на цих частотах буде використовуватися ультрамасивний MIMO з тисячами антен, які дозволять одночасно обслуговувати велику кількість користувачів і компенсувати високі втрати сигналу.

Ультрамасивний MIMO дозволить:

- Збільшити кількість одночасних потоків даних.
- Підвищити ефективність передачі на великих відстанях.
- Покращити продуктивність навіть у щільно населених середовищах, таких як "розумні міста".

Реконфігуровані інтелектуальні поверхні (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)

Інтелектуальні поверхні — це новий підхід у 6G, що дозволить використовувати пасивні пристрої для керування відбиттям і розповсюдженням радіохвиль. Поверхні можуть активно перенаправляти сигнали для покращення покриття та зниження згасань. MIMO-системи в 6G будуть взаємодіяти з RIS для:

- Підвищення енергоефективності шляхом мінімізації втрат на передачу.
- Створення кращих шляхів для сигналу в умовах багатопроменевості та складних середовищ.

Технологія Cell-Free MIMO

Порівняння методів з точки зору ефективності, енергоспоживання та обчислювальних витрат

Метод	Ефективність	Енергоспоживання	Обчислювальні витрати
Просторова мультиплексія (Spatial Multiplexing)	Висока пропускна здатність, підвищена спектральна ефективність.	Помірне. Більша кількість передавачів підвищує споживання енергії.	Високі. Потребує складних алгоритмів для декодування та розділення потоків даних.
Просторова диверсифікація (Spatial Diversity)	Висока надійність та якість зв'язку в умовах багатопроменевості.	Низьке або середнє. Використання антен для резервування підвищує стійкість без збільшення енергоспоживання.	Низькі. Простий алгоритм для забезпечення надійності.
Масивний MIMO (Massive MIMO)	Дуже висока ефективність для великих мереж. Підвищена пропускна здатність та кількість одночасних користувачів.	Високе через велику кількість антен та високу потужність передачі.	Високі. Велика кількість антен потребує значних обчислювальних ресурсів для обробки.
Алгоритми формування променя (Beamforming)	Підвищена ефективність передачі за рахунок напрямку сигналу. Мінімізує інтерференцію.	Низьке до середнього. Покращення ефективності передачі зменшує необхідну потужність.	Середні. Потрібна адаптація алгоритмів для динамічної зміни напрямку променя.
Попереднє кодування (Pre-coding)	Висока ефективність передачі завдяки адаптації до умов каналу. Зниження інтерференції.	Середнє. Може зменшити потужність за рахунок оптимізації передачі.	Високі. Необхідні обчислювальні ресурси для оптимізації передачі в реальному часі.
Метод детекції сигналів (Signal Detection)	Висока точність відновлення сигналів у складних умовах.	Низьке до середнього. Залежить від складності методу та умов мережі.	Високі. Складні алгоритми, такі як Zero-Forcing або MMSE, вимагають великих ресурсів для обробки.
Просторово-часові блокові коди (STBC)	Підвищує надійність передачі, особливо в умовах багатопроменевості.	Низьке. Використовує додаткові антени для підвищення надійності без значного збільшення енергоспоживання.	Низькі. Простий алгоритм для кодування та декодування.

Cell-Free MIMO — це нова парадигма, яка дозволяє передавати сигнали від багатьох антен, розміщених по всій території обслуговування, без фіксованого поділу на базові станції або "осередки". Кожен користувач може підключитися до декількох антен одночасно, що забезпечує:

- Рівномірний розподіл сигналу незалежно від положення користувача.
- Зменшення інтерференції між користувачами.
- Підвищення якості обслуговування у густонаселених міських районах та у віддалених зонах.

Квантові технології для обробки сигналів

У 6G можуть бути досліджені ідеї використання квантових обчислень для обробки великих обсягів даних у реальному часі, що зможе значно прискорити складні обчислення в MIMO-системах. Квантові алгоритми можуть застосовуватися для більш ефективної обробки сигналів і поліпшення детекції та корекції помилок.

Спільна передача (Coordinated Multi-Point, CoMP) та взаємодія з штучним інтелектом

У майбутніх мережах 6G розвиток CoMP дозволить кільком базовим станціям спільно передавати сигнал до одного користувача, зменшуючи інтерференцію та підвищуючи надійність передачі. AI може автоматично керувати такою координацією, адаптуючи передачу відповідно до змін умов каналу і динаміки мережі.

Гібридні системи MIMO

У 6G будуть досліджуватися можливості інтеграції кількох технологій MIMO в одній системі. Наприклад, комбінація Massive MIMO з мульти-користувацьким Beamforming та RIS дозволить створювати більш ефективні системи з високою пропускну здатністю, мінімальною затримкою та низьким енергоспоживанням.

8. Висновки

У дослідженні методів обробки сигналів для систем зв'язку з рознесеними передавальними та приймальними антенами було визначено, що такі методи, як попереднє кодування, детекція сигналів та просторово-часове блокове кодування (STBC), є ключовими для підвищення якості та ефективності зв'язку. Використання декількох антен дозволяє значно зменшити інтерференцію, покращити пропускну здатність та збільшити стійкість до шуму та помилок. Алгоритми детекції, як-от ZF та MMSE, допомагають забезпечити точність відновлення переданих сигналів навіть за несприятливих умов каналу. Просторово-часове блокове кодування, зокрема код Альям-Вейнера, надає додатковий рівень захисту від помилок через затухання сигналу.

Застосування методів MIMO у великих мережах значно впливає на якість зв'язку та управління інтерференцією. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) дозволяє використовувати кілька антен на передавальній і приймальній стороні, що впливає на поліпшення якості зв'язку. У великих мережах, де багато користувачів підключені одночасно, інтерференція може суттєво впливати на якість сигналу. MIMO-системи допомагають ефективно боротися з інтерференцією. MIMO сприяє ефективнішому використанню енергетичних та апаратних ресурсів за рахунок зниження необхідності у великій кількості базових станцій. Направлені сигнали (завдяки Beamforming) зменшують загальне випромінювання потужності, що особливо важливо для масових розгортань, наприклад, у "розумних містах" або інтернеті речей (IoT).

Застосування методів MIMO дозволяє значно підвищити якість зв'язку, знижуючи затухання та інтерференцію, що особливо важливо у великих мережах із щільним розташуванням користувачів. Завдяки вдосконаленим технологіям формування променя, попереднього кодування та багатокористувацького MIMO, ці системи ефективно використовують наявний спектр, покращують енергоефективність і підвищують надійність зв'язку навіть у складних середовищах.

Список використаної літератури

1. Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press.
2. Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
3. Biglieri, E., Tarokh, V., & Calderbank, R. (1998). Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction. *IEEE Transactions on Information Theory*, 44(2), 744-765.
4. Paulraj, A., Nabar, R., & Gore, D. (2003). *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge University Press.
5. Larsson, E. G., & Stoica, P. (2008). *Space-Time Block Coding for Wireless Communications*. Cambridge University Press.
6. Telatar, E. (1999). Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *European Transactions on Telecommunications*, 10(6), 585-595.
7. Love, D. J., Heath, R. W., & Strohmer, T. (2003). Grassmannian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems. *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(10), 2735-2747.
8. Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Wiley.
9. Alamouti, S. M. (1998). A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8), 1451-1458.
10. Foschini, G. J., & Gans, M. J. (1998). On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. *Wireless Personal Communications*, 6(3), 311-335.