

*Проект SWorld*



---

*Макарова И.В., Семенов Г.Н., Червоный И.Ф. и др.*

---

# **НАУКА И ИННОВАЦИИ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ: ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ**

---

ВХОДИТ В РИНЦ SCIENCE INDEX

присвоен DOI: 10.21893/978-617-7414-01-7-2

***МОНОГРАФИЯ***

Книга 2

Одесса  
Куприенко СВ  
2017

УДК 001.895

ББК 94

Н 34

*Авторский коллектив:*

Веркин Е.Н. (3), Габдрахманова К.Ф. (10.), Галиакбаров Р.Н. (3),  
Головко А.К. (7), Данилів А.Р. (9), Зибров В.А. (5),  
Зиброва Н.М. (5), Ковшов С.В. (6), Копистинський Л.О. (9),  
Кочковая Н.В. (2), Маврин В.Г. (3), Макарова И.В. (3),  
Михалевський Д.В. (8), Поляков А.Л. (3), Решенкин А.С. (2),  
Семенцов Г.Н. (9), Сидоркина Н.М. (2), Строителева Н.И. (7),  
Тихомиров Д.А. (2), Тюлевін С.В. (1.), Флоренсов А.Н. (4.),  
Червоный И.Ф. (7), Шубенкова К.А. (3)

Н 34 **Наука** и инновации в современном мире: техника и технологии. В 3  
книгах. К 2.: монография / [авт.кол. : Макарова И.В., Семенцов Г.Н.,  
Червоный И.Ф. и др.]. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2017 – 175 с. :  
ил., табл.

ISBN 978-617-7414-01-7

Монография содержит научные исследования авторов в области техники и технологий. Может быть полезна для инженеров, руководителей и других работников предприятий и организаций, а также преподавателей, соискателей, аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

**УДК 001.895**

**ББК 94**

**DOI: 10.21893/978-617-7414-01-7-2**

© Коллектив авторов, 2017

© Куприенко С.В., оформление, 2017

ISBN 978-617-7414-01-7



## ГЛАВА 8. ОСОБЛИВОСТІ КАНАЛЬНОГО ТА ФІЗИЧНОГО РІВНІВ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО ДЛЯ СТАНДАРТУ 802.11

### Вступ

На сучасному етапі розвитку, для мереж сімейства стандартів 802.11x, як і для будь-яких інших, є актуальною постановка та вирішення задач діагностики та контролю їх параметрів, що потребують пошук нових рішень для підвищення їх ефективності у зв'язку із стрімким зростанням об'ємів трафіку.

Як відомо [1], при проектуванні безпроводних мереж передачі інформації, одним із головних критеріїв їх ефективності є пропускна здатність каналу, а головною структурною одиницею – безпроводний канал. На величину пропускної здатності суттєво впливає значна кількість факторів, які можуть мати як постійний характер, так і випадковий. До найбільш вагомих можна віднести: імовірність суттєвого погіршення електромагнітної сумісності із-за наявності передавачів мереж інших стандартів та випромінювань від промислових і побутових об'єктів (так звані зовнішні шуми); інтерференційні завади, що обумовлені випромінюванням інших передавачів сімейства стандартів 802.11x; архітектурні перешкоди, які значно знижують рівень сигналу та зменшують дальність впевненого прийому. Крім того, існують методи що направлені на підвищення ефективності пропускної здатності мереж і каналів які також можна поділити на групи: програмні методи оптимізації корисної інформації, що передається по каналу (стиснення, видалення надлишковості та інш. [2]); апаратні методи, що призначенні для покращення параметрів каналу (OFDM, MCS, MIMO, технологія формування направленного променя та інш.[3]); методи оптимізації побудови мереж, що передбачають знаходження максимально можливої кількості необхідних параметрів та оцінок їх залежностей від особливостей безпроводного середовища передачі.

### 8.1. Постановка задачі

Сучасні методи побудови мультисервісних мереж, передбачають широке впровадження безпроводних систем передачі інформації, а саме високошвидкісних каналів із технологіями підвищення ефективності. Тому в даній роботі розглянемо технологію MIMO, як одну із самих швидко впроваджуваних для сімейства стандартів 802.11x, яка описується каналним та фізичним рівнем.

Як було встановлено у [4] і [5], використання тільки математичних методів для оцінки та контролю параметрів трафіку є недостатнім для сучасних мереж, Тому, в такому випадку, постає необхідність постановки та вирішення задач, які безпосередньо пов'язані із впливом характеристик каналу передачі та знаходження максимально можливої кількості необхідних параметрів та оцінок їх залежностей від особливостей безпроводного середовища передачі. Але наявність додаткової технології підвищення ефективності каналу потребує її попереднього теоретичного вивчення з метою встановлення всіх можливих факторів впливу. Тому, розглядаючи технологію MIMO, яка є доступною починаючи із стандарту 802.11n, відразу можна виділити дві групи розширень



канального та фізичного рівнів [6]: просторове мультиплексування (SM – spatial multiplexing), формування вузько-направленого променя (TxBF – transmit beamforming), просторово-часове блокове кодування (STBC – space-time block coding), використання кодів із малою густиною перевірок на парність (LDPC – low density parity check), метод вибору антени (ASEL) і технологія об'єднання частотних каналів; технологія об'єднання сигналів із забезпеченням максимального відношення сигнал/шум (MRC – Maximal Ratio Combining). Ці розширення реалізуються при наявності пристроїв із множиною приймально-передавальних блоків та антен, що реалізують технологію MIMO, а також у мережах які побудовані точками доступу із технологією MIMO [6]. Все це в сукупності і приводить до підвищення ефективності безпроводних каналів.

Таким чином, теоретично технологія MIMO може значно підвищувати ефективність безпроводного каналу за рахунок покращення його характеристик та створення паралельних просторових каналів, але разом з тим значно підвищується складність програмно-апаратної реалізації, що приводить до виникнення додаткових негативних факторів у порівнянні із звичайним каналом 802.11 [7,8,9]. Саме тому постає задача дослідити механізм реалізації технології MIMO для стандарту 802.11 щоб виявити переваги та недоліки для розробки ефективних методів діагностики та контролю безпроводних каналів.

## 8.2. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження технології MIMO для сімейства стандартів 802.11x, визначення основних параметрів та їх вплив на ефективну швидкість передачі інформації у безпроводному каналі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

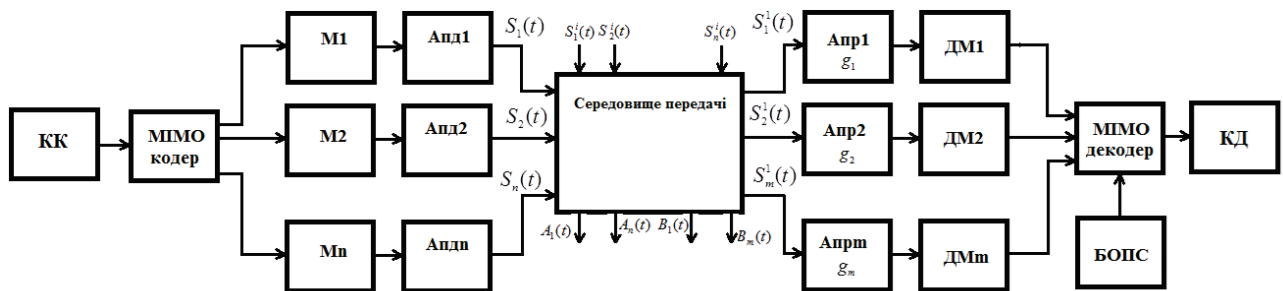
- провести дослідження фізичного рівня реалізації технології MIMO базового стандарту 802.11;
- виконати теоретичні дослідження впливу приймально-передавальної матриці MIMO на основні критерії ефективності;
- провести дослідження канального рівня та визначити додаткову керуючу інформацію, що стосується MIMO технології.

## 8.3. Особливості MIMO у стандарті 802.11

Як відомо [1], особливістю сімейства стандартів 802.11x є залежність пропускної здатності каналу від багатьох факторів які можуть мати як постійний характер, так і випадковий. Починаючи із стандарту 802.11n існує можливість використання технології MIMO яку можна охарактеризувати як дві групи розширень канального та фізичного рівнів. Вони дозволяють встановлювати різні режими роботи точок доступу, що дає можливість створення так званих високопродуктивних каналів (HT – high throughput) із теоретичною пропускною здатністю 600 Мб/с для стандарту 802.11n, та до 6,77 Гб/с для стандарту 802.11ac [3]. Це досягається за допомогою використання змінного індекса модуляції та схеми кодування MCS (Modulation & Coding Scheme), а також технології розширення спектру, створенням каналів шириною 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц та 160 МГц.



Основною структурною одиницею для технології MIMO є так зване радіо-коло, що визначається як сукупність одної пари приймально-передавальних блоків відповідного стандарту, включаючи змішувачі, підсилювачі та АЦП і ЦАП [6]. Це є не що інше як канал передачі інформації, для якого характерна модель радіоканалу із двома парами передавач-приймач, кожна з яких працює на одну антену. Для такого каналу, основними параметрами будуть сумарна потужність сигналів на вході приймача радіо-кола та ефективна швидкість передачі інформації [9]. На основі цього, враховуючи модель каналу стандарту 802.11x, який підтримує MIMO, для одного радіо-кола [1] та роботу [3], структуру безпроводного каналу із технологією MIMO можна представити як показано на рис.1.



**Рис. 1. Структура безпроводного каналу стандарту 802.11 з використанням технології MIMO**

На підрівнях LLC, MAC та PLCP виконується завадостійке кодування каналним кодером (КК) [1]. Далі присутній блок кодера MIMO, який реалізується із використанням зворотного швидкого перетворення Фур'є у якості модулятора [10]. Тут інформація перетворюється на частотні коефіцієнти, які після перетворення стають часовими інтервалами, кожен з яких відповідає одному із  $n$  передавачів. Для запобігання колізій додатково додаються захисні інтервали які мають назву циклових префіксів (CP - cyclic prefix) [11]. Відповідний інформаційний потік надходить у модулятор де за рахунок пари аналого-цифрових перетворювачів створюється реальна і уявна компоненти сигналу OFDM та перетворюється у модульований ВЧ сигнал. На виході передавальної антени ( $A_{пд,n}$ )  $n$ -го передавача формується сигнал  $S_n(t)$  та надходить у середовище передачі. На приймальній стороні всі операції виконуються в зворотному напрямку. При надходженні сигналу  $S_m^i(t)$  із середовища передачі отримуються блоки інформації від кожного приймального пристрою  $m$  ( $A_{пд,m}$ ,  $D_{м,m}$ ), а в декодері MIMO виконується швидке перетворення Фур'є на основі даних із блока оцінки параметрів сигналу (БОПС), створюючи результуючу послідовність. Як правило, у середовищі передачі існують завади природного характеру, від пристроїв систем передачі та побутових приладів –  $B_1(t)..B_m(t)$  та інтерференційні завади –  $A_1(t)..A_n(t)$ , які вносять інші передавачі стандартів 802.11x  $S_1^i(t)..S_n^i(t)$  [1]. Крім того, до завад можна віднести завади які створюються множиною радіо-кіл, так як вони



працюють на одному частотному каналі і в кожній приймальній антені  $A_{\text{пд.м}}$  буде наводитись сигнал від кожної передавальної антени  $A_{\text{пд.п.}}$ . Як показують дослідження [9,12] рівень випромінювання для кожної антени є однаковим, а сумарна потужність не перевищує 100 мВт.

#### 8.4. Математична модель МІМО каналу

Загальна математична модель для систем із застосуванням технології МІМО визначається із загальної моделі безпроводного каналу [13], що є найменшою структурною одиницею – просторовий канал передачі інформації або радіо коло [6]. Таким чином, враховуючи [1] і структуру на рис. 1, таку модель можна записати як рівень сигналу на вході пиймача:

$$S_m(t) = \sqrt{S/N} \cdot a(t) \cdot S_n(t) + A_n(t) + B_m(t),$$

де  $a(t)$  – коефіцієнт який враховує послаблення та завмирання передавального сигналу.

Оскільки, технологія МІМО передбачає наявність множини приймальних антен та множини передавальних антен і відповідних їм радіо кіл, то в такому випадку кожна приймальна антена буде отримувати сигнал від кожної передавальної антени, створюючи при цьому комплексний сигнал на вході приймача. Найпростіший варіант передбачає вибір приймачем найкращого сигналу із множини сигналів на приймальних антенах. Тоді для кожного радіо кола існує дія інтерференційних та шумових завад та існує свій коефіцієнт затухання  $a_i(t)$  [14]. Таким чином, для масиву приймально передавальних антен можна записати так:

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_m(t) \end{bmatrix} = \sqrt{S/N} \cdot \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_i(t) \end{bmatrix} \cdot S_n(t) + \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}$$

Сама по собі така система дає змогу покращувати ефективність безпроводного каналу та отримала назву технології об'єднання сигналів із забезпеченням максимального відношення сигнал/шум (MRC – Maximal Ratio Combining). При цьому всі прийняті сигнали на всі доступні антени, якщо вони прийняті один до одного у фазі, об'єднуються в один комбінований, який має вищий рівень ніж при наявності одного передавача [15]. В результаті цього, буде виконуватись нерівність:

$$S_{MRC}(t) = \sqrt{\frac{S}{N}} \cdot (|a_1(t)|^2 + |a_2(t)|^2 + |a_i(t)|^2) \cdot S_n(t) + \begin{bmatrix} a_1^i(t) \\ a_2^i(t) \\ a_i^i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}$$

де  $a_i^i(t)$  – коефіцієнт який враховує послаблення та завмирання передавального сигналу для інтерференційного кола матриці МІМО.

При використанні МІМО системи для створення незалежних безпроводних





каналів, наприклад від точки доступу до різних абонентів із індивідуальними радіоколами в такому випадку використовується просторове мультиплексування (SM – spatial multiplexing) [16]. В такому випадку загальний потік інформації збільшується за рахунок збільшення кількості незалежних каналів передачі, яке обмежується максимально можливим числом радіокіл. В такому випадку вся система описується як  $n \times m$  (див рис. 1). Враховуючи максимально можливий рівень випромінювання сигналу передавача для стандарту 802.11, потужність для кожної передавальної антени буде поділятися на кількість передавачів, щоб сумарне значення не перевищувало граничні норми (як правило 100мВт). Таким чином, для такого режиму роботи математична модель каналу запишеться так:

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_n(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{S}{Nm}} \cdot \begin{bmatrix} a_{11}(t) \dots a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) \dots a_{2n}(t) \\ a_{m1}(t) \dots a_{mn}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix}$$

Як відомо [15], системи стандарту 802.11 для передачі інформації використовують OFDM. Тому для отримання інформації із підносійних у частотному каналі виконується операція порівняння переданого сигналу із шумоподібним сигналом який можна визначити за формулами:

$$S_{uu}(t) = S_n(t) + \left( \sqrt{S/N} \cdot a(t) \right)^{-1} \cdot (A_n(t) + B_m(t)),$$

$$S_{uu}^{MRC}(t) = S_n(t) + \frac{1}{\sqrt{S/N} (|a_1(t)|^2 + |a_i(t)|^2)} \begin{bmatrix} a_1^i(t) \\ a_2^i(t) \\ a_i^i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix},$$

$$S_{uu}^{m \times n}(t) = S_n + \frac{A_{m \times n}}{\sqrt{S/Nm} (A_{m \times n} A'_{m \times n})} \begin{bmatrix} A_1(t) + B_1(t) \\ A_2(t) + B_2(t) \\ A_n(t) + B_m(t) \end{bmatrix},$$

де  $S_{uu}(t)$  – шумоподібний сигнал для одного радіокола;  $S_{uu}^{MRC}(t)$  – шумоподібний сигнал для технології MRC;  $S_{uu}^{m \times n}(t)$  шумоподібний сигнал просторового мультиплексування для будь-якої кількості приймальних та передавальних антен;  $A_{m \times n}$  – матриця характеристик затухання  $a_{mn}(t)$ ;  $A'_{m \times n}$  – зворотна матриця характеристик затухання  $a_{mn}(t)$ ;  $S_n$  – матриця сигналів від передавальних антен.

Смність каналу можна визначити за допомогою формули Шеннона [14]. Враховуючи наявне затухання у каналі для одного радіокола можна записати так:

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} |a(t)|^2 \right),$$



А при наявності  $n$  випромінюючих антен та  $m$  приймальних антен ємність каналу складе:

$$C = \log_2 \left( B_m + \frac{S}{Nm} A_{m \times n} A'_{m \times n} \right),$$

де  $B_m$  – матриця затухань сигналу приймачів MIMO.

### 8.5. Структура кадру каналного рівня

Для роботи пристрою із технологією MIMO, починаючи із стандарту 802.11n, використовуються додаткові керуючі інформаційні поля. Вони формуються на підрівні PLCP фізичного рівня, де формується кадр PPDU шляхом додавання заголовку до кадрів MPDU [17]. Такі кадри використовуються для суміщеного режиму передачі і містять коротку та довгу синхропослідовності як для низькошвидкісного режиму, так і для високошвидкісного режиму. Але до синхропослідовності високошвидкісного режиму додатково додається інформація про створення MIMO каналу. Керуюча інформація про наявність просторово-розділених потоків передачі інформації MIMO знаходиться у MAC заголовку та містить додаткове керуюче поле високошвидкісного режиму HT (КПНТ), яке має довжину 4 байти і структуру, як показано на рис. 2.

Кадр MPDU має наступні складові, які детально розглядались у [5] і [17]: MAC заголовок (керуюче поле (КП), поле мережного вектора розміщення (ПМВР), поле адресації (ПА), поле керування послідовністю (ПКП), поле контролю якості QoS (ПКЯ), поле КПНТ), поле даних (ПД) та поле циклічного надлишкового коду (ЦНК).

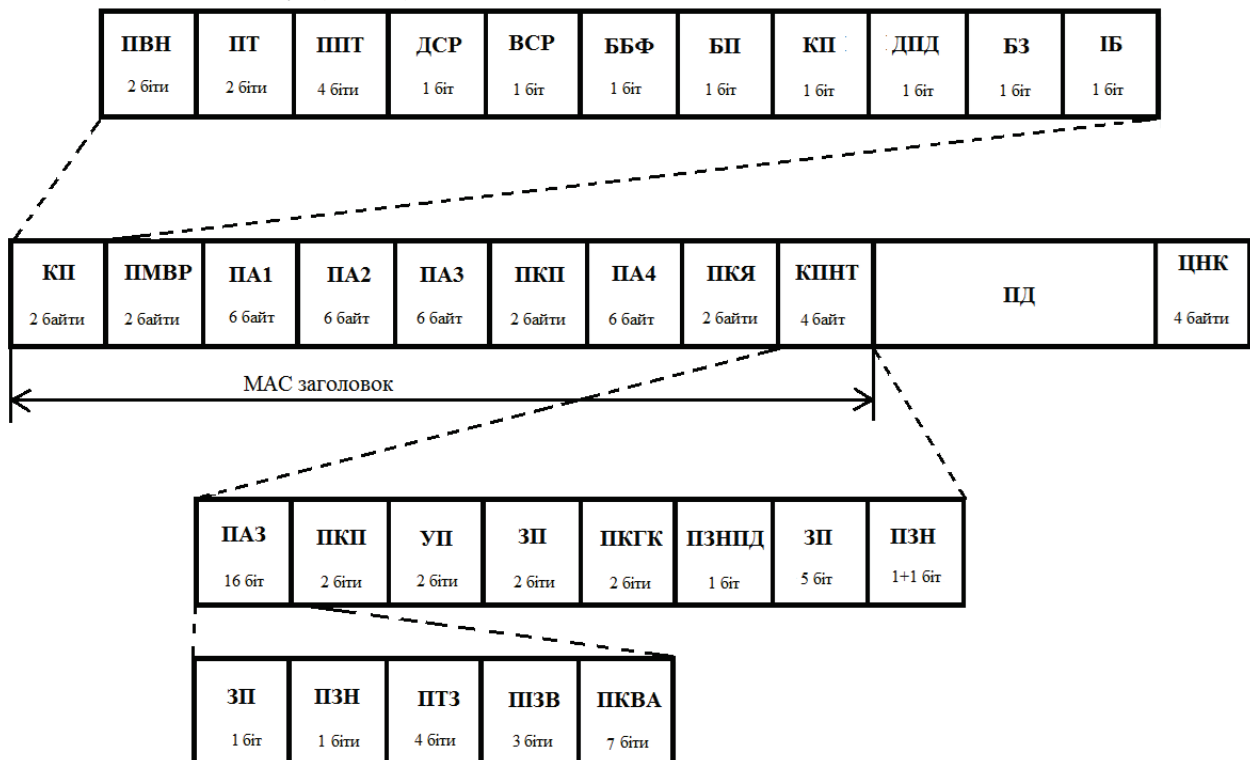


Рис. 2. Структура кадру MPDU стандарту 802.11n





Поле КПНТ містить в собі: підполе контролю адаптації з'єднання (ПАЗ), яке виконує функцію оптимального вибору параметрів каналу між приймачем і передавачем та вибір схеми кодування MCS; підполе калібрування позиції (ПКП), виконує функції узгодження передавального та приймального пристрою; узгоджуюча послідовність ідентифікаторів зондуючих пакетів (УП); зарезервоване поле (ЗП); підполе керування головного каналу (ПКГК), використовується для ідентифікації типу відповіді при використанні зондуючих кадрів PPDU; поле задання нульового пакету даних (ПЗНПД) для процедури зондування (встановлення в одиницю задає надсилання нульового пакету PPDU наступним); два підполя протоколу зворотного напрямку (ПЗН), які в свою чергу, виконують функцію підвищення ефективності передачі інформації між станціями.

Керуюче поле складається із наступних частин: підполе версії протоколу (ПВП), яке вказує на належність кадру до відповідного стандарту; підполе типу (ПТ) та підполе підтипу (ППТ), що використовуються для визначення функції кадру; біти індикації до системи розподілу (ДСР) та від системи розподілу (ВСР), які встановлюють потік кадрів між зовнішнім середовищем та системою розподілу; біт більшого фрагменту (ББФ), вказує що даний кадр містить частину повідомлення, продовження якого передається у наступному кадрі; біт повтору передачі кадру (БП); біт керування потужністю (КП), що може встановлювати енергозберігаючий режим; додаткове поле даних (ДПД), для прийняття кадру під час режиму енергозбереження; біт захисту (БЗ), для визначення наявності у кадрі шифрування; та індикаторний біт (ІБ).

В свою чергу, індикаторний біт виконує функцію вмикання режиму НТ, та показує наявність поля КПНТ у MAC заголовку. Цей біт вказує приймальній станції, що кадр повинен декодуватись із використанням високошвидкісного режиму. Саме із цього параметру визначається подальша передача даних що стосується використання технології MIMO. При встановленні ІБ в одиницю, до кадру MPDU додається інформаційне поле КПНТ, в якому підполе ПАЗ містить інформацію про початкове налаштування MIMO каналу та має наступну структуру (див. рис. 2). Перший біт є зарезервованим (ЗП). Другий біт використовується як поле для підготовки запиту (ПЗ) до приймача для передачі зондуючого кадру PPDU. В такому випадку зондуючий кадр використовується для технології формування променя з метою калібрування радіо кіл та як механізм визначення керувальної матриці MIMO. Поле типу запиту (ПТЗ) являє собою інформацію яка може встановлювати призначення останнього поля і є індикатором команд ASEL. Для використання MIMO використовується значення 14, що є ідентифікатором для використання поля керування вибором антен (ПКВА), яке містить в собі команди для методу ASEL. І накінець поле ідентифікатора зворотної відповіді (ПЗВ) показує наявність кадру підтвердження успішної передачі інформаційного кадру.

## 8.6. Інформаційний елемент узгодження

Для керування процесом передачі інформації у каналі в стандарті 802.11 використовуються керуючі кадри (Management frames) в інформаційному полі



яких містяться так звані інформаційні елементи (HT information element) для встановлення (HT capabilities element) та керування (HT operations element) високошвидкісного режиму передачі інформації [6]. Оскільки MIMO використовується для створення високошвидкісного каналу, то вся інформація про доступні апаратні можливості приймача і передавача міститься у інформаційному елементі узгодження (HT capabilities element), структура якого наведена на рис. 3.

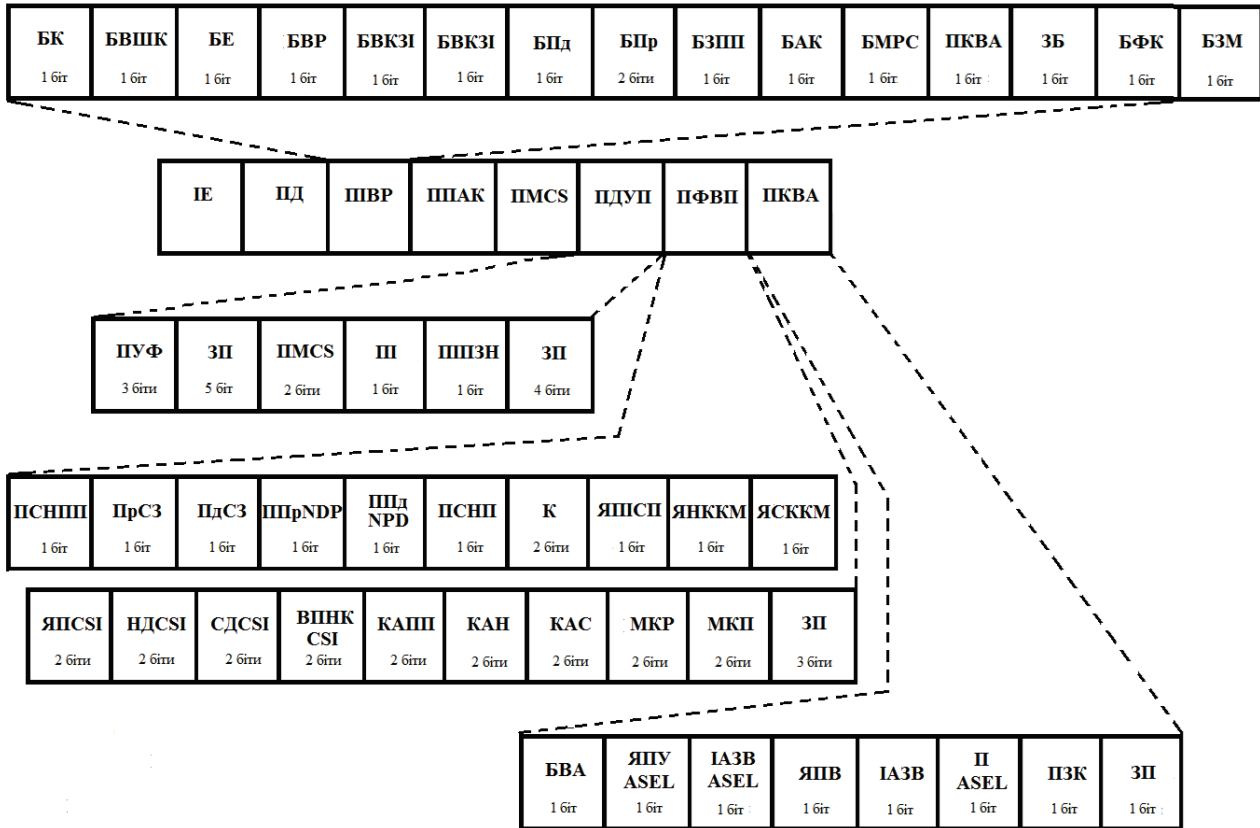


Рис. 3. Структура інформаційного елемента узгодження

Передача інформації із використанням MIMO визначається як високошвидкісний режим, тому основна керуюча інформація міститься в узгоджувачому інформаційному елементі. В загальному існує чотири типи інформаційних елементів, тип яких визначається ідентифікатором (ІЕ), який в даному випадку встановлюється в 45, та полем довжини (ПД), яке встановлюється в 26 (довжина в байтах).

Поле яке містить інформацію про особливості роботи високошвидкісного режиму (ПВР), має довжину два байти та показує які технології використовуються при передачі інформації [6]. Його структура являє собою керуючі біти, перший біт з яких показує готовність приймачем приймати пакети із кодуванням LDPC (БК). Далі біт вибору ширини каналу (БВШК), біт енергозбереження (БЕ), біт узгодження високопродуктивного режиму (БВР), наступні два біти встановлення короткого захисного інтервалу (БВКЗІ). Просторово-часове блокове кодування технології MIMO використовується для підвищення надійності передачі даних та вказується бітом передачі (БПд) та бітами прийому (БПр) для закодованого PPDU кадру таким методом. Вони



вказують на кількість підтримуваних просторових потоків передачі даних в каналі. Наступний біт – затримка для блокового пакету підтвердження (БЗПП), що забезпечує наявність методу оптимізації службової інформації в каналі використанням одного загального пакету підтвердження АСК для багатьох переданих кадрів в режимі однонаправленої передачі [18]. Далі йде біт максимальної довжини кадрів для методу агрегації кадрів MSDU (БАК), біт узгодження методу розширення спектра стандарту 802.11g (БМРС), зарезервований біт (ЗБ), біт включення методу формування каналу шириною 40 МГц для частотного діапазону 2,4 ГГц (БФК) та біт захисного механізму для короткої синхропослідовності L-SIG (БЗМ).

Поле параметрів агрегації кадрів (ППАК) містить інформацію про метод об'єднання кадрів типу MPDU для підвищення пропускної здатності, та містить підполя даних про максимальну та мінімальну довжину агрегованого кадру.

Для встановлення та вибору можливої швидкості передачі інформації існує механізм керування пропускною здатністю каналу з використанням індексу модуляції та схеми кодування (MCS). Інформація про всі можливі режими MCS із врахуванням максимальної кількості підтримуваних просторових потоків MIMO знаходиться в полі PMCS довжина якого становить 16 байт.

Високошвидкісний режим передачі також має додаткові розширенні параметри узгодження які містяться у полі ПДУП. Воно містить 3 біти інформації про підтримку режиму сумісного існування фаз (PCO – Phased Coexistence Operation) для узгодження із пристроями старих стандартів ПУФ; зарезервовані поля на 5 біт і 4 біт (ЗП); поле зворотного зв'язку MCS (PMCS) використовується для індикації готовності прийому зворотного зв'язку для схеми MCS, яка має особливість динамічної зміни та використовується із протоколом узгодження каналу у MAC заголовку кадру у полі КПНТ; поле індикації наявності поля КПНТ у MAC заголовку (ПІ); поле індикатора протокола зворотного напрямку (ППЗН).

Технологія формування вузько-направленого променя використовує поле ПФВП, яке має довжину 4 байти і містить ряд дозволів. Оскільки тут використовується явні та неявні методи апроксимації фізичних процесів для оцінки характеристик MIMO каналу, тому для правильної оцінки передавач отримує зворотну відповідь від приймача, яка в залежності від типу роботи MIMO системи поділяється на два види [6]: неявний зворотній зв'язок, який оцінюється із довгої синхропослідовності прийнятого кадру PPDU від підлаштовуваного пристрою (Implicit feedback); явний зворотній зв'язок, який оцінюється із довгої синхропослідовності прийнятого кадру PPDU від формувача променя (Explicit feedback). Таким чином, сумісність пристрою із неявним методом визначається у полях: підполе сумісності неявної передачі (ПСНП), підполе сумісності неявної передачі приймача (ПСНПП).

Для явного методу використовується зворотна відповідь яка не потребує необхідності у калібруванні, але створює додаткове навантаження у приймачі. В цьому випадку формувач променя (beamformer) отримує зворотну відповідь від підлаштовуваного пристрою (beamformee). Ця відповідь може містити наступну інформацію: інформацію стану каналу, що містить інформацію про



MIMO коефіцієнти для визначення керувальної матриці формувачем (тут використовується додатковий синхрокадр CSI); нестиснену відповідь, що являє собою обчислену керуючу матрицю підлаштуванням пристроєм та надіслану до формувача променя; стисненні дані про керуючу матрицю і надіслану до формувача. Цей неявний метод керується через наступні поля: поле явної передачі інформації стану каналу (ЯПІСК); поле явних нестиснених коефіцієнтів керувальної матриці (ЯНККМ); поле явних стиснених коефіцієнтів керувальної матриці (ЯСККМ).

Крім того, відповідь від підлаштуваного пристрою містить інформацію про наявність команд затримок або безпосередньої посилки із-за наявності захисних інтервалів між кадрами [18]. Ця інформація міститься у полі явної передачі CSI відповіді (ЯПСІ), полі нестиснених даних CSI (НДСІ) та полі стиснених даних CSI (СДСІ) а також поле визначення підтримки мінімально можливої кількості CSI відповіді (ВПК CSI).

Поле калібрування (К) використовується для узгодження передавача та приймача та складається із двох частин що передбачають обмін зондуючими кадрами PPDU між пристроями та отримання синхровідповіді для кадру CSI, на базі чого вираховується керувальна матриця MIMO. Структура кадру CSI наведено на рис. 4.

<b>ПТК</b> 16=HT 1 байт	<b>ПП</b> 4=CSI 1 байт	<b>ПММО</b> 6 байт	<b>ПВ CSI</b>
-------------------------------	------------------------------	-----------------------	-------------------

Рис. 4. Структура кадру SCI

Такий кадр, має типову побудову для керуючих кадрів складається із поля типу кадру ПТК із встановленим у 16, поля призначення ПП, яке встановлене у 4 (для кадрів типу CSI – синхрокадр), поля керування MIMO та поля синхровідповіді CSI, яке має змінну довжину.

Для синхронізації використовується зондуючий кадр PPDU. Так як операція синхронізації може використовувати більше одного циклу то для цього використовується поле ПЗНПД (див рис. 2) яке встановлюється в одиницю при формуванні нульового кадру (NDP). Нульовий кадр формується на основі MSDU шляхом відсутності даних в інформаційному полі, а потім додаванням заголовку PPDU формуючи зондуючий кадр. Для керування цим використовуються поля сумісності прийому (ППрNDP) та передачі (ППдNDP). кадру NDP. Крім того, для зондування просторово розділених каналів використовується складене зондування (straggared sounding), де синхропослідовність LTF передається для кожного просторового потоку, Це керується полями сумісності передачі (ППдСЗ) та прийому (ПрСЗ) складеного зондування.

Наступні поля відповідають за керуванням масивом антен які приймають участь у формуванні направлено променя. До цього відноситься поле яке показує максимальну кількість антен формувача променя які може





підтримувати підлаштовуваний пристрій (КАПП) при наявності відповіді CSI, аналогічні поля які відповідають стисненій (КАС) або нестисненій відповіді CSI (КАН); поле максимальної кількості рядків для CSI відповіді (МКР); поле максимальної кількості просторово часових потоків (МКП) для каналу визначеним на основі прийнятого зондуючого кадру PPDU; зарезервованого поля (ЗП).

І накінець, поле керування для вибору антен ASEL (ПКВА) містить інструкції для динамічного створення необхідної кількості радіо-кіл із доступним масивом антен. Керуюча інформація для цього поля міститься у полі КПНТ кадру MSDU у підполі ПКВА (див. рис. 2). Поле КПНТ інформаційного елемента на рис. 3 має довжину 7 біт, перші три з яких містять команди ASEL, а наступні містять дані про відіслані команди. ПКВА являє собою групу бітів кожен з яких показує наявність певної функції встановленням в одиницю. В першу чергу наявність ASEL показує біт вибору антен (БВА). Якщо він встановлений в 1, після чого є доступними наступні функції: явна передача CSI відповіді за допомогою передачі ASEL узгодження (ФЯПУ ASEL); зворотна відповідь ідентифікаторів антен із підтримкою передачі ASEL узгодження (ФІАЗВ ASEL); явна передача CSI відповіді (ФЯПВ); зворотна відповідь ідентифікаторів (ФІАЗВ); прийом ASEL узгодження (П ASEL); передача зондуючого кадру PPDU (ПЗК); зарезервоване поле (ЗП).

### **Висновки**

Отже, в даній роботі було проведено дослідження технології MIMO для безпроводного каналу стандарту 802.11. Виконуючи теоретичний аналіз каналного та фізичного рівнів, визначено основні параметри, що мають вплив на якість передачі інформації.

Було запропоновано загальну структуру безпроводного каналу стандарту 802.11 із MIMO, яка враховує найбільш вагомні фактори впливу на критерії ефективності. На основі проведених досліджень було встановлено:

- використання одночасно декількох антен випромінювання збільшує зону впевненого прийому сигналу, а наявність паралельних просторових каналів дозволяє збільшувати пропускну здатність потоку інформації еквівалентно їх кількості. Але в такому випадку це приводить до виникнення цілого ряду дестабілізуючих факторів таких як, наприклад, взаємні інтерференційні завади, які потребують подальших досліджень у реальних умовах;

- при використанні матриці приймально-передавальних антен існує можливість підвищувати рівень сигнал/шум за рахунок об'єднання сигналів на приймально-передавальних антенах у один комбінований, що задовільняє умові – чим вища потужність сигналу на вході приймача, та чим менша потужність сигналу від інтерференційної точки доступу, тим менше помилок та затримок буде при сеансах передачі пакетів. Крім того, така матриця дозволяє створювати незалежні радіо-кола між точкою доступу та користувачами;

для керування технологією MIMO використовується додаткова керуюча інформація яка збільшує МАС заголовок інформаційного кадру на 4 байти. Параметри режиму передачі із MIMO містяться у інформаційному елементі



узгодження для керуючих кадрів. Крім того, додатково застосовується процедура калібрування всієї антенної матриці із використанням зондуючих кадрів, що додає додаткове навантаження службової інформації на канал та вносить затримки для передачі корисної інформації.