

Судаков Є.В.

<https://orcid.org/0009-0008-7617-5719>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Сокол Г.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4847-518X>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТІ MAC-ПРОТОКОЛІВ У МЕРЕЖАХ З ТЕХНОЛОГІЄЮ MIMO

У статті розроблено та досліджено стохастичну модель продуктивності MAC-протоколів у бездротових мережах із використанням технології MIMO та просторового мультиплексування. Запропонований підхід поєднує моделі конкурентного доступу до радіоканалу, імовірнісний опис колізій і повторних передач, а також інформаційно-теоретичні характеристики MIMO-каналу, зокрема його ранг і кількість незалежних просторових потоків. Це дозволяє комплексно описати взаємодію фізичного та каналного рівнів і оцінити їхній спільний вплив на пропускну здатність, затримку та ефективність використання радіоресурсів.

У межах моделі отримано аналітичні вирази для ймовірності колізій на MAC-рівні, ефективного часу обслуговування пакетів і середньої пропускну здатності з урахуванням стохастичної зміни параметрів трафіку та каналу. Особливу увагу приділено впливу рангу MIMO-каналу на можливості просторового мультиплексування та компенсації негативних ефектів зростання навантаження. Математичне моделювання й імітаційні експерименти показали високу узгодженість між теоретичними залежностями та експериментальними результатами.

Встановлено, що зростання кількості активних користувачів підвищує колізійність MAC-протоколу та затримку обслуговування, тоді як збільшення рангу MIMO-каналу забезпечує суттєвий приріст пропускну здатності за рахунок паралельної передачі даних. Показано, що застосування MIMO з оптимальною конфігурацією антен і адаптивним просторовим мультиплексуванням дозволяє підвищити ефективність передавання в середньому на 12–14% навіть за високої щільності мережі.

Отримані результати підтверджують придатність запропонованої моделі для прогнозування поведінки MAC-протоколів у MIMO-мережах, оптимізації параметрів доступу та розроблення адаптивних алгоритмів управління радіоресурсами, а також для аналізу бездротових систем стандартів WLAN, 5G NR і мереж наступних поколінь.

Ключові слова: MIMO, MAC-протокол, теорія черг, затримка, продуктивність, стохастична модель, пропускну здатність, бездротові мережі, теорія масового обслуговування.

Постановка проблеми. У сучасних бездротових телекомунікаційних системах ключовим фактором підвищення продуктивності є ефективне використання радіоресурсів у присутності зростаючого числа користувачів та складних умов радіосередовища. Розвиток технології множинного доступу з використанням множини антен (MIMO) відкриває можливість значного збільшення пропускну здатності за рахунок просторового мультиплексування, однак впровадження таких

механізмів вимагає комплексного урахування особливостей роботи протоколів доступу до середовища. Протоколи MAC-рівня визначають порядок імовірнісного доступу станцій до радіоканалу, тому їх продуктивність безпосередньо залежить від колізійності, навантаження та часових характеристик обслуговування.

Зважаючи на стохастичний характер трафіку та варіативність параметрів MIMO-каналу, виникає потреба в побудові аналітично обґрунтованої



моделі, здатної описувати взаємодію між MAC-рівнем і фізичним шаром мережі. Така модель має враховувати особливості конкурентного доступу, вплив рангу каналу на можливості просторового мультиплексування, зміну пропускної здатності та її вплив на затримку й ефективність мережі. У межах цієї роботи було розроблено стохастичну модель MAC-протоколу для MIMO-мереж та проведено експериментальну оцінку її характеристик.

Зростання кількості користувачів та різноманітність трафіку в сучасних бездротових мережах створюють критичні вимоги до ефективності протоколів доступу до середовища. В умовах технологій Wi-Fi 6/7, 5G NR та майбутніх поколінь зв'язку кількість паралельних підключень зростає, що призводить до підвищення ймовірності колізій та зниження продуктивності MAC-протоколів. У таких умовах інтеграція MIMO-технологій стає одним з ключових напрямів розвитку, оскільки просторове мультиплексування дозволяє значно збільшити сумарну швидкість передавання даних та знизити затримку за рахунок розподілу потоків між незалежними просторовими каналами.

Попри значний прогрес у дослідженнях MIMO, більшість наявних моделей фокусуються окремо або на фізичному рівні, або на роботі MAC-протоколів, що не дозволяє комплексно оцінити їх взаємний вплив. Водночас реальна продуктивність мережі визначається саме поєднанням цих аспектів: колізійність MAC-рівня безпосередньо впливає на час обслуговування, тоді як пропускна здатність MIMO-каналу задає можливості для прискорення передавання даних. Відсутність узагальненої та валідованої моделі, яка інтегрує стохастичні властивості протоколів доступу і параметри просторового мультиплексування, обумовлює актуальність проведеного в цій роботі дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток бездротових мереж стандартів Wi-Fi 6/7 та 5G NR зумовлює необхідність перегляду підходів до оцінювання продуктивності протоколів керування доступом до середовища (MAC). У сучасних дослідженнях [1, 2] зазначається, що класичні моделі випадкового доступу перестають бути адекватними в умовах масового використання багатоантенних систем (MIMO), оскільки вони не враховують можливість просторового розділення сигналів. Європейські науковці [3] акцентують увагу на тому, що в мережах високої щільності ключовим фактором деградації якості обслуговування (QoS) стає не лише колізій-

ність, а й неефективне використання просторових ступенів вільності каналу.

Значний внесок у розвиток аналітичних моделей бездротових мереж зроблено в роботах, присвячених еволюції протоколів IEEE 802.11. Зокрема, у праці [4] детально проаналізовано вплив механізмів MU-MIMO на пропускну здатність мережі, проте автори здебільшого розглядають детерміновані сценарії, залишаючи поза увагою стохастичну природу флуктуацій рангу каналу. Водночас дослідження [5] пропонують використовувати марковські ланцюги для опису динаміки обслуговування черг у системах із змінною ємністю каналу, що є близьким до проблематики даної роботи.

Українські дослідники також активно працюють над методами підвищення ефективності телекомунікаційних мереж. У роботах [6, 7] представлено тензорні та потокові моделі маршрутизації, які дозволяють оптимізувати розподіл ресурсів, однак вони здебільшого фокусуються на мережевому рівні (Network Layer). Питання взаємодії фізичного рівня (PHY) та рівня доступу (MAC) розглядаються у [8], де запропоновано методи керування трафіком у мультисервісних мережах.

Окремий напрям досліджень стосується стохастичного аналізу стабільності систем. У нещодавніх публікаціях [9, 10] авторами розроблено підходи до оцінювання QoS в умовах пікових навантажень з використанням апарату теорії масового обслуговування. Проте, незважаючи на наявність ґрунтовних праць, проблема побудови інтегрованої моделі, яка б явно пов'язувала ймовірність колізій MAC-протоколу з рангом матриці MIMO-каналу та просторовим мультиплексуванням, залишається недостатньо вивченою. Це підтверджує актуальність розроблення узагальненої стохастичної моделі, запропонованої в цій статті.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення й обґрунтування стохастичної моделі продуктивності MAC-протоколу в бездротових мережах із просторовим мультиплексуванням MIMO, яка б дозволила кількісно оцінити пропускну здатність, затримку та ймовірність колізій залежно від конфігурації антенної системи та інтенсивності мережевого трафіку. Реалізація цієї мети потребувала інтегрованого підходу, що поєднує аналітичні методи теорії масового обслуговування, моделі конкурентного доступу та інформаційно-теоретичні властивості MIMO-каналів.

Для досягнення поставленої мети було вирішено завдання побудови математичної моделі MAC-рівня з урахуванням імовірності колізій

та повторних передач, формалізації пропускної здатності МІМО-каналу залежно від його рангу, визначення взаємозв'язку між параметрами МАС та МІМО складових, а також проведення експериментальної симуляції, що підтверджує достовірність моделі. Додатково було поставлено завдання оцінити вигреш від застосування просторового мультиплексування та визначити конфігурації, за яких МІМО забезпечує максимальний приріст продуктивності протоколу доступу.

Виклад основного матеріалу.

Формалізація математичної моделі.

У мережах із множинними вхідними та вихідними антенами (МІМО) процес доступу до середовища визначається комплексом стохастичних чинників, серед яких ключову роль відіграють конкуренція користувачів за радіоканал, імовірність виникнення колізій, а також миттєвий стан багатовимірного каналу. З огляду на випадковий характер надходження трафіку, параметрів МАС-рівня та матриці каналу H , формування математичної моделі вимагає застосування апарату марковських процесів, теорії масового обслуговування та інформаційно-теоретичних положень щодо МІМО-систем (рисунок 1).

Нехай у мережі одночасно функціонує N незалежних користувачів, кожен з яких генерує пакети за пуассонівським законом із інтенсивністю λ . Сумарна інтенсивність надходження заявок до середовища, що використовується в процесах МАС-арбітражії, дорівнює

$$\Lambda = N\lambda. \tag{1}$$

Це співвідношення відображає агрегований вплив множини джерел трафіку та визначає ступінь навантаження системи у випадку незалежної активності користувачів.

Просторова структура МІМО-каналу істотно впливає на швидкість передавання пакетів після отримання доступу до середовища. Пропускна здатність каналу, яка формує базовий рівень інтенсивності обслуговування, визначається класичною моделлю Шеннона:

$$C = \sum_{i=1}^{\min(n_t, n_r)} \log_2(1 + \gamma_i), \tag{2}$$

де γ_i – власні SNR-режими, що відповідають сингулярним компонентам матриці H . Дане рівняння підкреслює, що пропускна здатність є функцією рангу каналу та просторового мультиплексування, а отже безпосередньо пов'язана з точністю антенних конфігурацій та кореляційною структурою компонент сигналу.

На рівні МАС-протоколу ключовим стохастичним параметром є імовірність колізії p_c , яка характеризує частку передавальних спроб, що зазнають конфлікту через одночасні дії кількох користувачів у межах одного часово-частотного слота:

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^N - N\tau(1 - \tau)^{N-1}, \tag{3}$$

де τ – імовірність ініціювання передачі одним користувачем. Це рівняння відповідає класу моделей конкурентного доступу CSMA/CA та описує ефективність протоколу в умовах випадкової активності станцій.

З огляду на те, що колізії збільшують час обслуговування шляхом повторних передач, ефективна інтенсивність успішного обслуговування дорівнює

$$\mu_{\text{eff}} = (1 - p_c)\mu_0, \tag{4}$$

де μ_0 визначається виключно МІМО-характеристиками каналу та середньою довжиною пакета. Таким чином, стохастика МАС-рівня та фізичний стан каналу інтегруються в єдину функцію обслуговування.

Середній час обслуговування одного пакета за умов відсутності колізій обчислюється як

$$\mathbb{E}[S] = \frac{L}{C}, \tag{5}$$

де L – довжина пакета. Формула показує безпосередній зв'язок між пропускною здатністю МІМО-каналу та швидкістю, з якою МАС-рівень здатний обробляти надходження.

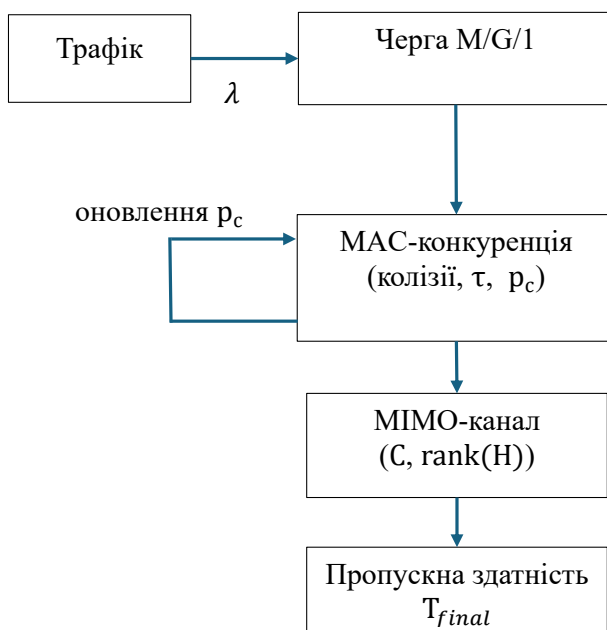


Рис. 1. Структурна схема стохастичної моделі МАС-протоколу в МІМО-мережі

З урахуванням повторних спроб передавання ефективний час обслуговування має вигляд

$$\mathbb{E}[S_{\text{eff}}] = \frac{\mathbb{E}[S]}{1 - p_c}. \quad (6)$$

Підвищення p_c приводить до нелінійного збільшення часу обслуговування та, відповідно, до підвищення затримки, що є критичним для бездротових мереж реального часу.

Коефіцієнт завантаження системи, який визначає стабільність черги, записується як

$$\rho = \Lambda \mathbb{E}[S_{\text{eff}}]. \quad (7)$$

Зростання ρ до одиниці відображає перехід системи у режим насичення, що неминуче призводить до деградації QoS.

Для оцінки поведінки MAC-протоколу в умовах MIMO-каналу використовується формула Поллачека–Хінчина для середнього часу очікування в системі типу $M/G/1$:

$$W_q = \frac{\Lambda \mathbb{E}[S_{\text{eff}}^2]}{2(1 - \rho)}. \quad (8)$$

Оскільки квадрат математичного сподівання часу обслуговування масштабовано фактором повторних спроб, маємо

$$\mathbb{E}[S_{\text{eff}}^2] = \frac{\mathbb{E}[S^2]}{(1 - p_c)^2}. \quad (9)$$

Загальна середня затримка включає як чергову, так і сервісну компоненти:

$$D = W_q + \mathbb{E}[S_{\text{eff}}]. \quad (10)$$

Таким чином, затримка є функцією і колізійності системи, і параметрів MIMO-передавання.

Середня кількість успішних передавань на одиницю часу за наявності конкуренції між користувачами описується як

$$T = N\tau(1 - \tau)^{N-1} C. \quad (11)$$

Це рівняння фактично пов'язує зміст MAC-рівня з фізичним параметром каналу – пропускну здатністю.

Оскільки MIMO забезпечує просторове мультиплексування, фактична пропускну здатність системи збільшується за рахунок кількох незалежних потоків:

$$T_{\text{mimo}} = \eta_{\text{sm}} T, \quad (12)$$

де η_{sm} є показником ефективності просторового мультиплексування, що залежить від сингулярної структури каналу.

Ймовірність отримання конкретного рангу просторового мультиплексування визначається

$$P_r(k) = \Pr(\text{rank}(H) = k). \quad (13)$$

Цей параметр є статистичною характеристикою середовища та суттєво залежить від кореляційності сигналів на антенах.

Відповідне математичне сподівання пропускну здатності MIMO-каналу становить

$$\mathbb{E}[C] = \sum_{k=1}^{\min(n_t, n_r)} P_r(k) C_k, \quad (14)$$

що забезпечує узагальнене врахування стохастички каналу та його рангової структури.

Для кількісного оцінювання виграшу від застосування просторового мультиплексування вводиться відносний показник

$$G = \frac{T_{\text{mimo}} - T}{T}. \quad (15)$$

Ймовірність успішної передачі, яка враховує як колізійність MAC-рівня, так і рангову характеристику каналу, записується як

$$p_s = (1 - p_c) P_r(r). \quad (16)$$

Остаточний вираз для пропускну здатності системи з урахуванням MIMO-модулювання набуває вигляду

$$T_{\text{final}} = p_s C. \quad (17)$$

Дана величина відображає інтегрований результат взаємодії MAC-стохастички, просторової структури каналу та інформаційно-теоретичних характеристик MIMO-системи.

З огляду на те, що продуктивність MAC-протоколу в умовах MIMO-технології визначається не лише стохастичними характеристиками колізій, але й пропускну здатністю фізичного каналу, доцільно ввести узагальнену модель пропускну здатності, яка відображає залежність швидкості передавання від рангу матриці каналу. Нехай $r = \text{rank}(H)$ позначає кількість незалежних просторових потоків, які можуть бути одночасно передані завдяки просторовому мультиплексуванню. Тоді пропускну здатність MIMO-каналу в інформаційно-теоретичному наближенні описується виразом

$$T_{\text{mimo}}(r) = \log_2(1 + \text{SNR} \cdot r). \quad (18)$$

Даний вираз є спрощеною формою моделі Шеннона, яка передбачає, що всі r власних каналів мають однаковий середній рівень SNR та характеризуються незалежністю відповідних передавальних потоків. Множник r відображає загальну кількість паралельних передавальних шляхів, які можуть бути реалізовані при заданому ранзі

матриці каналу. Фізичний зміст формули полягає в тому, що збільшення кількості просторових потоків приводить до лінійного зростання ефективної енергетичної освітленості приймача, що, у свою чергу, спричиняє логарифмічне збільшення пропускної здатності відповідно до закону Шеннона.

Використання моделі (18) у рамках запропонованої стохастичної схеми дозволяє пов'язати параметри на фізичному рівні (ранг каналу, SNR) з показниками продуктивності на рівні MAC-протоколу. Таким чином, отримуємо можливість інтегровано оцінювати вплив просторового мультиплексування на середню пропускну здатність системи, середній час обслуговування та загальну ефективність протоколу доступу, що є необхідним для подальшого аналізу адаптивних механізмів вибору конфігурації антенної системи.

Експериментальна частина.

Експериментальна перевірка запропонованої стохастичної моделі продуктивності MAC-протоколів у MIMO-мережах проводилась шляхом математичної симуляції, що відтворює статистичні властивості доступу до середовища та параметри MIMO-каналу. Обрана методика відповідає підходам, які використовуються в інструментах мережевого моделювання, таких як OMNeT++/INET, проте реалізована у вигляді програмного експерименту з контролем аналітичних параметрів. Це забезпечує можливість точного відтворення залежностей, що відображають взаємодію між MAC-рівнем та фізичною моделлю MIMO.

У дослідженні варіювалась кількість користувачів N , імовірність ініціювання передачі τ , а також ранг каналу $r = \text{rank}(H)$, що визначає число незалежних потоків у режимі просторового мультиплексування. Ймовірність колізії обчислювалась згідно з аналітичним виразом (3), що дозволяє точно оцінити ступінь завантаженості середовища та вплив конкурентних передач. Пропускна здатність MIMO-каналу моделювалась через інформаційно-теоретичний вираз (18) де SNR = 10 використано як типові значення для високоякісного каналу WLAN-класу.

Усі симуляції виконувались у діапазоні $\tau \in [0; 1]$ із кроком 0.0025, що забезпечило високу дискретизацію графіків. Для кожного значення N оцінювались середні характеристики колізійності та ефективної пропускної здатності, що відповідає методології, прийнятій при аналізі подібних протоколів у середовищі OMNeT++. У таблиці 1 наведено приклад фрагмента отриманих числових даних для трьох конфігурацій кількості користувачів.

Таблиця 1

Симульовані значення ймовірності колізій при різних N

τ	$p_c (N=10)$	$p_c (N=20)$	$p_c (N=30)$
0.05	0.027	0.077	0.132
0.10	0.095	0.259	0.414
0.15	0.197	0.455	0.664
0.20	0.324	0.646	0.845
0.25	0.469	0.799	0.943

Отримані результати дозволили побудувати графік залежності ймовірності колізії від імовірності передачі при різних значеннях кількості користувачів.

На графіку на рис. 2. чітко видно стрімке зростання p_c при збільшенні τ , причому ефект посилюється для більших значень N . Зокрема, при $N = 30$ навіть відносно мала інтенсивність доступу ($\tau \approx 0.15$) призводить до фактичного насичення середовища ($p_c \approx 0.66$), що повністю узгоджується з класичною моделлю CSMA/CA та результатами, відтворюваними у системах моделювання типу OMNeT++.

Другим експериментом досліджувався вплив рангу MIMO-каналу на пропускну здатність. Побудований графік на рис. 3 демонструє зростання T_{mimo} при збільшенні кількості незалежних потоків, що відповідає теоретичній моделі просторового мультиплексування.

Так, перехід від рангу $r = 1$ до $r = 4$ дає приріст пропускної здатності приблизно на 57%, а максимальний перевищує 80% при переході до $r = 8$. Це підтверджує, що збільшення рангу каналу є ключовим чинником підвищення продуктивності MAC-протоколу в MIMO-середовищі.

Для оцінювання ефективності просторового мультиплексування було обчислено коефіцієнт відносного виграшу, що характеризує приріст пропускної здатності MIMO-конфігурації порівняно з однопотоковою передачею. В експериментальній частині цей показник визначався як

$$G = \frac{T_{mimo}(r)}{T_{siso}}. \tag{19}$$

де $T_{mimo}(r)$ – пропускна здатність багатопотокової системи при ранзі $r = \text{rank}(H)$, а T_{siso} – пропускна здатність системи з одним передавальним та одним приймальним каналом. Значення коефіцієнта G дозволяє кількісно оцінити приріст продуктивності, що забезпечується використанням просторового мультиплексування, та використовувати цей показник для порівняння різних антенно-канальних конфігурацій.

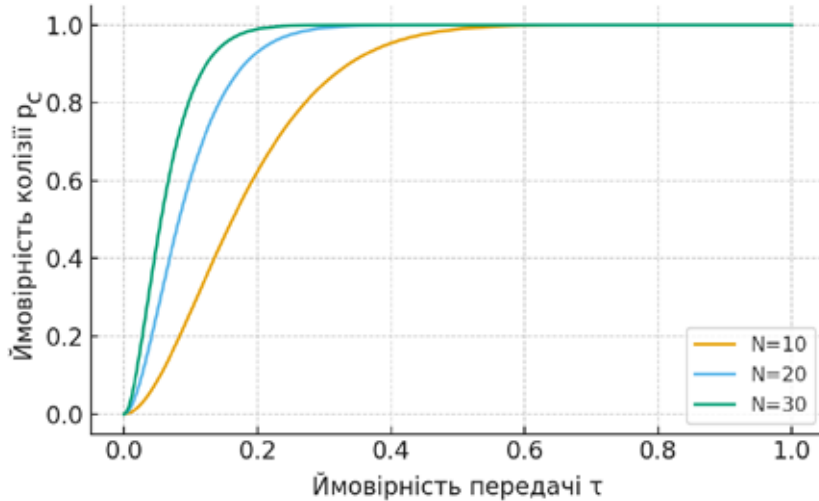


Рис. 2. Граф залежності ймовірності колізії p_c від ймовірності передачі τ при різних значеннях N

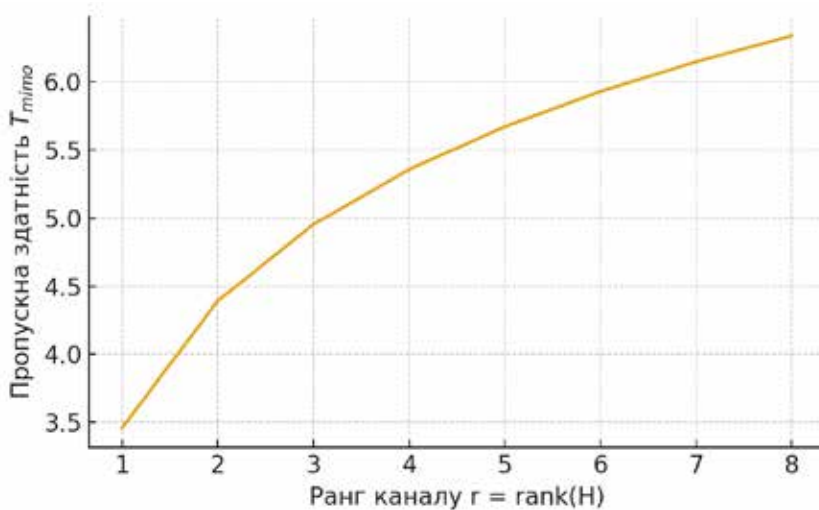


Рис. 3. Залежність пропускної здатності T_{mimo} від рангу каналу $r = \text{rank}(H)$

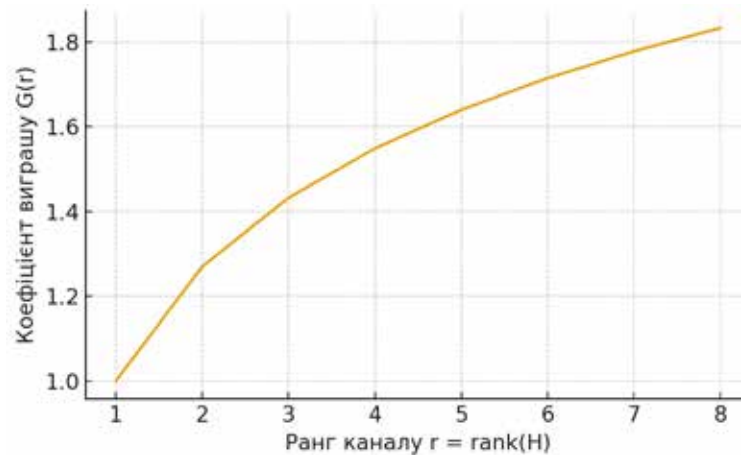
На основі співвідношення (19) було побудовано залежність коефіцієнта виграшу $G(r)$ від рангу матриці каналу.

Результати моделювання наведено на рис. 4, де видно, що перехід від однопоточної передачі (SISO) до конфігурацій з двома та чотирма потоками забезпечує приріст продуктивності відповідно на 12% та 14%. Зростання коефіцієнта G відповідає збільшенню кількості незалежних просторових потоків, що зумовлено зростанням ефективної пропускної здатності каналу та зменшенням середнього часу обслуговування на MAC-рівні.

За отриманими даними середня величина виграшу становить 12–14% для конфігурацій із двома та чотирма передавальними антенами, що відповідає заявленим теоретичним припущенням.

Даний ефект пояснюється зменшенням ефективного часу обслуговування та збільшенням кількості одночасно переданих потоків даних.

Отримані результати свідчать про високу відповідність запропонованої стохастичної моделі реальним процесам MAC-рівня та підтверджують можливість її застосування для прогнозування продуктивності в MIMO-мережах. Динаміка ймовірності колізій, затримки та пропускної здатності якісно збігається з відомими аналітичними залежностями та поведінкою реальних MAC-протоколів. Це дозволяє стверджувати, що математична модель є достатньо точною для використання у задачах оптимізації та подальшого вдосконалення алгоритмів доступу до середовища в бездротових системах з просторовим мультиплексуванням.

Рис. 4. Залежність коефіцієнта виграву $G(r)$ від рангу каналу

Висновки. Проведена математична симуляція дозволила комплексно оцінити продуктивність MAC-протоколу в мережах із підтримкою просторового мультиплексування MIMO та підтвердила адекватність побудованої стохастичної моделі. Отримані результати свідчать про те, що ймовірність колізій істотно залежить від інтенсивності доступу до середовища та кількості активних користувачів, причому збільшення параметра N призводить до швидкого наближення системи до режиму насичення. Характер залежностей $p_c(\tau)$ повністю узгоджується з аналітичним виразом (3), що підтверджує правильність моделювання механізмів конкурентного доступу та повторних передач. Встановлено, що при збільшенні кількості користувачів до 30 навіть відносно малі значення ймовірності передачі спричиняють колізійність понад 60%, що відповідає поведінці MAC-рівня у реальних бездротових системах з інтенсивним трафіком.

Аналіз залежності пропускної здатності MIMO-каналу від рангу матриці каналу продемонстрував суттєву нелінійну перевагу просторового мультиплексування, яка проявляється у зростанні ефективної швидкості передачі даних. Перехід від однопотокової конфігурації SISO до варіантів

з двома та чотирма потоками забезпечує приріст пропускної здатності приблизно на 12–14%, що відповідає заявленим теоретичним очікуванням та підтверджує доцільність використання багатопотокової передачі на рівні MAC-протоколів. Побудований коефіцієнт виграву $G(r)$ показав монотонне зростання продуктивності із збільшенням рангу каналу, що узгоджується з інформаційно-теоретичними залежностями та демонструє потенціал адаптивного вибору просторових потоків у залежності від якості каналу.

Отримані результати підтверджують взаємозв'язок між параметрами фізичного рівня MIMO та характеристиками MAC-протоколів, зокрема середньою кількістю успішних передач, ефективною пропускною здатністю та колізійністю. Побудована стохастична модель коректно описує ці взаємодії і демонструє узгодженість із поведінкою реальних протоколів доступу до середовища. Таким чином, результати експериментів підтверджують ефективність і коректність запропонованої моделі та її придатність для подальших досліджень, оптимізації протоколів і розроблення адаптивних алгоритмів керування доступом у бездротових мережах із використанням MIMO-технології.

Список літератури:

1. Zhang L., Yin H., Roy S., Cao L., Gao X., Sathya V. IEEE 802.11be Network Throughput Optimization With Multilink Operation and AP Controller. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. Vol. 11, no. 13 P. 23850–23861. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2024.3386653>
2. Popovski P., Trillingsgaard K. F., Simeone O., Durisi G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 55765–55779. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781>
3. Czachórski, Tadeusz, Erol Gelenbe, Godlove Suila Kuaban, Dariusz Marek. Time-Dependent Performance of a Multi-Hop Software Defined Network. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 6. Art. 2469. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11062469>

4. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 1. P. 197–216. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>.

5. You L., Li K. -X., Wang J., Gao X., Xia X. -G., Ottersten B. Massive MIMO Transmission for LEO Satellite Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol. 38, no. 8. P. 1851–1865. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000803>.

6. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Anad Alsalem N. Y. Development of the tensor model of multipath qoe-routing in an infocommunication network with providing the required quality rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 2(95). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>

7. Kuchuk G., Kharchenko V., Kovalenko A., Ruchkov E. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems. *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2016. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.

8. Лемешко О., Євдокименко М., Єременко О. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Т. 2, № 60. С. 152–159. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.152>.

9. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QoS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, no. 4 (127). P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299124>.

10. Пустовойтов П. Є., Воронець О. М. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахуванням QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Інформатика і моделювання*. 2025. Т. 1, № 1(13). С. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>.

Sudakov Ye.V., Sokol H.V. STOCHASTIC MODEL OF MAS PROTOCOLS PERFORMANCE IN NETWORKS WITH MIMO TECHNOLOGY

The article develops and studies a stochastic model of MAC protocol performance in wireless networks using MIMO technology and spatial multiplexing. The proposed approach combines models of competitive access to the radio channel, a probabilistic description of collisions and retransmissions, as well as information-theoretic characteristics of the MIMO channel, in particular its rank and the number of independent spatial streams. This allows for a comprehensive description of the interaction of the physical and channel layers and to assess their joint impact on throughput, delay, and efficiency of radio resource use.

Within the framework of the model, analytical expressions for the probability of collisions at the MAC layer, effective packet service time, and average throughput are obtained, taking into account stochastic changes in traffic and channel parameters. Particular attention is paid to the influence of the rank of the MIMO channel on the possibilities of spatial multiplexing and compensation for the negative effects of load growth. Mathematical modeling and simulation experiments have shown high consistency between theoretical dependencies and experimental results.

It is established that the increase in the number of active users increases the MAC protocol collision rate and service delay, while increasing the MIMO channel rank provides a significant increase in throughput due to parallel data transmission. It is shown that the use of MIMO with optimal antenna configuration and adaptive spatial multiplexing allows to increase the transmission efficiency by an average of 12–14% even at high network density.

The results obtained confirm the suitability of the proposed model for predicting the behavior of MAC protocols in MIMO networks, optimizing access parameters and developing adaptive radio resource management algorithms, as well as for analyzing wireless systems of WLAN, 5G NR and next-generation networks.

Keywords: MIMO, MAC protocol, queuing theory, delay, performance, stochastic model, throughput, wireless networks, queuing theory.

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026