ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток цифрової економіки та поява нових класів сервісів, таких як автономний транспорт, телемедицина та промисловий інтернет речей (IIoT), висувають безпрецедентні вимоги до мереж мобільного зв’язку п’ятого покоління (5G). Традиційні архітектури радіодоступу, що базуються на статичному розподілі ресурсів та жорсткій прив’язці до фізичного обладнання, вичерпують свій потенціал у забезпеченні необхідної гнучкості та низької затримки.

Одним із найбільш перспективних напрямів розв’язання цієї проблеми є концепція віртуальних стільників (Virtual Cells). Завдяки технологіям програмно-визначених мереж (SDN) та віртуалізації мережевих функцій (NFV), стає можливим відійти від фізичних меж стільника та динамічно формувати зони покриття навколо конкретного користувача. Це дозволяє суттєво підвищити ефективність використання частотного спектра, мінімізувати інтерференцію та забезпечити стабільно високу якість обслуговування (QoS) у високонавантажених сегментах мережі. Аналіз ефективності таких рішень є критично важливим для оптимізації розгортання мереж 5G, що і зумовлює актуальність даного дослідження.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та аналітичне оцінювання ефективності впровадження технології віртуальних стільників для підвищення пропускної здатності та надійності мереж 5G.

Об’єкт дослідження – процеси передачі даних та управління радіоресурсами в мережах мобільного зв’язку п’ятого покоління (5G).

Предмет дослідження – методи та алгоритми формування віртуальних стільників та їх вплив на продуктивність мережевої інфраструктури.

Методи дослідження. У роботі використано методи системної динаміки для моделювання складних взаємодій у мережі, математичний апарат диференціальних рівнянь для формалізації процесів передачі даних, а також

методи статистичного аналізу та ітераційного моделювання для ва
отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексному підході до оцінювання віртуальних стільників, що враховує як переваги динамічного масштабування ресурсів, так і обчислювальні затримки, зумовлені шаром віртуалізації.

Практичне значення. Результати дослідження можуть бути використані операторами мобільного зв’язку та розробниками мережевого обладнання для оптимізації алгоритмів розподілу ресурсів у високонавантажених міських середовищах, що дозволить знизити витрати на інфраструктуру при збереженні високих показників якості послуг.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІРТУАЛЬНИХ СТІЛЬНИКІВ У МЕРЕЖАХ 5G

1.1. Архітектура мережі 5G та принципи розподілу радіоресурсів

Поява технології 5G знаменує собою значний крок вперед у бездротовому зв'язку, обіцяючи безпрецедентні швидкості, наднадійні з'єднання з низькою затримкою та розширену ємність для підтримки екосистеми Інтернету речей (IoT), що розвивається. Центральним елементом реалізації цих можливостей є складна мережева архітектура, спеціально розроблена для потреб сучасних цифрових додатків. Доповнюють цю архітектуру передові принципи розподілу радіоресурсів, які забезпечують ефективну, справедливу роботу мережі з мінімальною затримкою. У цьому есе досліджуються фундаментальні компоненти архітектури мережі 5G, основні принципи управління радіоресурсами та критична роль управління спектром в оптимізації продуктивності мережі [1].

Архітектура мереж 5G — це складна та високоінтегрована система, що складається переважно з базової мережі та мережі радіодоступу (RAN). Базова мережа в 5G була перероблена, щоб стати більш гнучкою, масштабованою та хмарно-орієнтованою, підтримуючи різноманітні послуги та розгортання, такі як мережеве сегментування, яке дозволяє операторам створювати кілька віртуальних мереж, оптимізованих для конкретних випадків використання. RAN, з іншого боку, включає передові технології, такі як масивні антени MIMO (Multiple Input Multiple Output) та формування променя, що значно підвищує спектральну ефективність та покриття. На відміну від попередніх поколінь, архітектура 5G робить акцент на віртуалізації та хмарно-орієнтованих технологіях, розгортаючи мережеві функції як екземпляри програмного забезпечення, які можна динамічно створювати, масштабувати та керувати в розподілених центрах обробки даних. Такий підхід не тільки зменшує залежність від обладнання, але й прискорює розгортання, спрощує обслуговування та забезпечує оптимізацію мережі в режимі реального часу. Наприклад, мережеве сегментування дозволяє одній фізичній мережі обслуговувати різноманітні потреби, такі як високошвидкісний

широкосмуговий доступ, критичний зв'язок для служб екстреної допомоги та малопотужні пристрої Інтернету речей, кожна з яких має індивідуальний розподіл ресурсів. Цей архітектурний зсув являє собою зміну парадигми від монолітних, апаратно-орієнтованих систем до гнучких, програмно-визначених мереж, розроблених для швидкої адаптації до мінливих потреб користувачів.

Таблиця 1.1 подає узагальнену порівняльну характеристику технологій 4G, 5G та 5G Advanced, відображаючи ключові параметри, що визначають їхню продуктивність і технічний рівень: тип радіодоступу, максимально досяжні швидкості передавання даних, затримку, можливості MIMO, ширину використовуваного спектра та основні сценарії застосування [2].

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика технологій 4G, 5G та 5G Advanced

Параметр	4G	5G	5G Advanced
Тип радіодоступу	LTE	5G NR	5G NR-Advanced
Максимальна швидкість DL	1 Гбіт/с	10–20 Гбіт/с	До 40 Гбіт/с
Затримка	20–30 мс	1–10 мс	<1 мс
MIMO	8x8	64T64R	128T128R+
Спектр	До 20 МГц	100–400 МГц	Ширші смуги, агрегація FR1+FR2
Сценарії	eMBB	eMBB, URLLC, mMTC	Розширений URLLC, XR, Holographic

Наведені значення дають змогу наочно простежити еволюцію мобільних технологій від LTE до 5G та його покращеної версії, що забезпечує значно вищу пропускну здатність, менші затримки, підтримку масових підключень і розширені можливості для інтенсивних цифрових сервісів.

Розподіл радіоресурсів у 5G керується принципами, спрямованими на максимізацію ефективності, забезпечення справедливості між користувачами та зменшення затримки для підтримки програм реального часу. Основні радіоресурси включають спектр — діапазон частот, виділених для бездротового зв'язку; потужність передачі, яка впливає на покриття та перешкоди; та часові слоти, які організовують передачу даних по спільних каналах. Мета полягає в оптимізації використання цих ресурсів для задоволення різноманітних вимог до послуг, від високопродуктивної потокової передачі мультимедіа до наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC) для автономних транспортних засобів. Стратегії розподілу ресурсів у 5G є переважно динамічними, використовуючи дані реального часу та складні алгоритми для адаптації до змінних мережевих умов, мобільності користувачів та моделей трафіку. Наприклад, у години пік мережа може надавати пріоритет додаткам, чутливим до затримки, шляхом перерозподілу спектру та потужності між критично важливими користувачами, тоді як статичне розподілення може використовуватися в менш перевантажених середовищах для забезпечення узгодженості. Такі методи, як агрегація несучих та формування променя, є прикладами динамічного підходу, що дозволяє більш гнучко та ефективно використовувати діапазони частот. Впровадження цих стратегій гарантує, що мережі 5G можуть ефективно балансувати конкуруючі вимоги та забезпечувати надійну продуктивність у різних сценаріях.

Управління спектром є життєво важливим аспектом продуктивності мережі 5G, що включає розподіл та використання різних діапазонів частот для задоволення значних потреб сучасного бездротового зв'язку. 5G використовує широкий діапазон спектру, від традиційних діапазонів нижче 6 ГГц до міліметрових хвильових частот, кожен з яких пропонує унікальні переваги з точки зору ємності та покриття. Для підвищення ефективності використання спектру використовуються такі методи, як спільне використання спектру, коли кілька користувачів або служб використовують один і той самий діапазон частот, та агрегація несучих, що об'єднує кілька несучих для створення ширшої смуги пропускання. Ці методи дозволяють більш гнучко та ефективно використовувати

обмежені спектральні ресурси, збільшуючи загальну ємність мережі та забезпечуючи вищі швидкості передачі даних. Розумне управління спектром також впливає на покриття; наприклад, частоти нижче 6 ГГц пропонують ширше покриття, що підходить для розгортання в сільській місцевості та на великих територіях, тоді як міліметрові хвильові діапазони забезпечують надвисоку ємність у щільному міському середовищі, але з обмеженим радіусом дії. Ефективне управління спектром, таким чином, передбачає балансування цих компромісів для оптимізації покриття, пропускної здатності та якості обслуговування. Оскільки спектр стає дефіцитним ресурсом, інноваційні методи спільного використання та агрегації будуть важливими для підтримки експоненціального зростання підключених пристроїв та трафіку даних, гарантуючи, що мережі 5G зможуть задовольнити майбутні потреби [3].

Алгоритми планування є основоположними для ефективної роботи мереж 5G, оскільки вони визначають, як радіоресурси розподіляються між користувачами та програмами в режимі реального часу. Одним із поширених методів є пропорційно справедливе планування, яке забезпечує баланс між максимізацією загальної пропускної здатності та забезпеченням справедливого доступу для всіх користувачів шляхом розподілу ресурсів на основі якості їхнього каналу та історичного використання. Іншим широко використовуваним методом є кругове планування, яке рівномірно розподіляє ресурси в циклічному порядку, забезпечуючи простоту та справедливість, але потенційно жертвуючи ефективністю в дуже мінливих мережевих умовах. Оскільки 5G прагне підтримувати наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) для критично важливих програм, таких як автономне водіння та дистанційна хірургія, Традиційні методи планування були адаптовані для задоволення цих суворих вимог щодо затримки та надійності. Схеми пріоритизації використовуються для розподілу мінімально необхідних ресурсів для трафіку, чутливого до затримки, часто виключаючи менш критичні дані, коли це необхідно. Крім того, машинне навчання почало відігравати дедалі більшу роль в оптимізації рішень щодо планування, аналізуючи величезні обсяги мережевих даних для прогнозування

моделей трафіку, мобільності користувачів та стану каналів. Ці інтелектуальні алгоритми можуть динамічно коригувати політики планування, покращувати використання ресурсів та зменшувати затримку, тим самим підвищуючи загальну продуктивність мережі та підтримуючи різноманітні вимоги додатків 5G.

Технології формування променя та множинних входів та виходів (MIMO) є основою досягнень 5G у спектральній ефективності та пропускній здатності мережі. Формування променя передбачає спрямування радіосигналів у цільових напрямках, а не рівномірне мовлення, що концентрує енергію на конкретних користувачах або пристроях. Ця сфокусована передача підвищує силу сигналу, зменшує перешкоди та покращує загальну якість зв'язку, особливо в щільному міському середовищі. Масовий MIMO, розширення традиційної технології MIMO, використовує великі масиви антен, які часто налічують сотні, для одночасного обслуговування кількох користувачів в одному діапазоні частот. Завдяки використанню просторового мультиплексування, Massive MIMO значно підвищує спектральну ефективність та ємність мережі, дозволяючи більшій кількості пристроїв підключатися з вищою швидкістю передачі даних. Синергія між формуванням променя та Massive MIMO дозволяє мережам 5G ефективніше використовувати доступний спектр, підтримувати вищу пропускну здатність та підтримувати надійне з'єднання навіть за високого навантаження користувачів. Ці технології також сприяють розширеному просторовому повторному використанню, коли кілька сигналів передаються одночасно в різних напрямках, що ще більше розширює ємність мережі. Як результат, формування променя та MIMO відіграють важливу роль у задоволенні зростаючих потреб у бездротовій пропускній здатності, покращенні використання ресурсів та забезпеченні розгортання щільних високопродуктивних мереж 5G.

Забезпечення якості обслуговування (QoS) та визначення пріоритетів є критично важливим у мережах 5G, враховуючи широкий спектр застосувань — від чутливих до затримки пристроїв Інтернету речей до потокового передавання високої чіткості — які потребують різних рівнів обслуговування. Стратегії QoS включають класифікацію трафіку на основі його вимог та впровадження таких

механізмів, як резервування пропускної здатності, формування трафіку та черги пріоритетів, для гарантування стандартів продуктивності. Наприклад, критично важливим програмам, таким як зв'язок автономних транспортних засобів, надається вищий пріоритет над менш чутливими до часу даними, що забезпечує досягнення цільових показників затримки та надійності. Методи резервування ресурсів розподіляють виділені ресурси для високопріоритетного трафіку, запобігаючи перевантаженням та забезпечуючи стабільне надання послуг. Крім того, такі механізми, як формування трафіку та контроль доступу, допомагають регулювати навантаження мережі, уникаючи сценаріїв перевантаження, які можуть погіршити якість обслуговування (QoS). Однак підтримка високого рівня QoS стає дедалі складнішою в умовах перевантаженої мережі, де конкуруючі вимоги до обмежених ресурсів можуть призвести до затримок, втрати пакетів або переривань обслуговування. Для вирішення цих проблем необхідні адаптивні стратегії управління QoS, які динамічно перепризначають пріоритети та оптимізують розподіл ресурсів. Ці стратегії спираються на аналітику мережі в режимі реального часу та інтелектуальні алгоритми для балансування різноманітних потреб додатків, гарантуючи, що критично важливі послуги залишаються незмінними навіть у періоди високого обсягу трафіку [4].

Схема (рис. 1.1) демонструє узагальнену архітектуру радіодоступу 5G із включенням рівня керування віртуальними стільниками, показуючи взаємодію між ключовими елементами RAN та ядра мережі. У центральному блоці CU розміщені протокольні рівні RRC та PDCP, а також модуль Virtual Cell Management, який відповідає за логічне формування та динамічне управління віртуальними стільниками. Нижче відображено DU, що виконує функції RLC, MAC і PHY та реалізує планування ресурсів через Scheduler, який узгоджує розподіл PRB/TTI та роботу з блоком Radio Unit, де здійснюється обробка PHY та формування променів. Справа подано елементи 5GC (AMF, SMF, UPF), що керують мобільністю, сесіями та маршрутизацією даних. Уся схема підкреслює, як віртуалізовані функції CU, DU та RU разом із централізованим керуванням

дозволяють створювати адаптивні віртуальні стільники, оптимізувати розподіл ресурсів і підвищувати загальну ефективність мережі 5G.

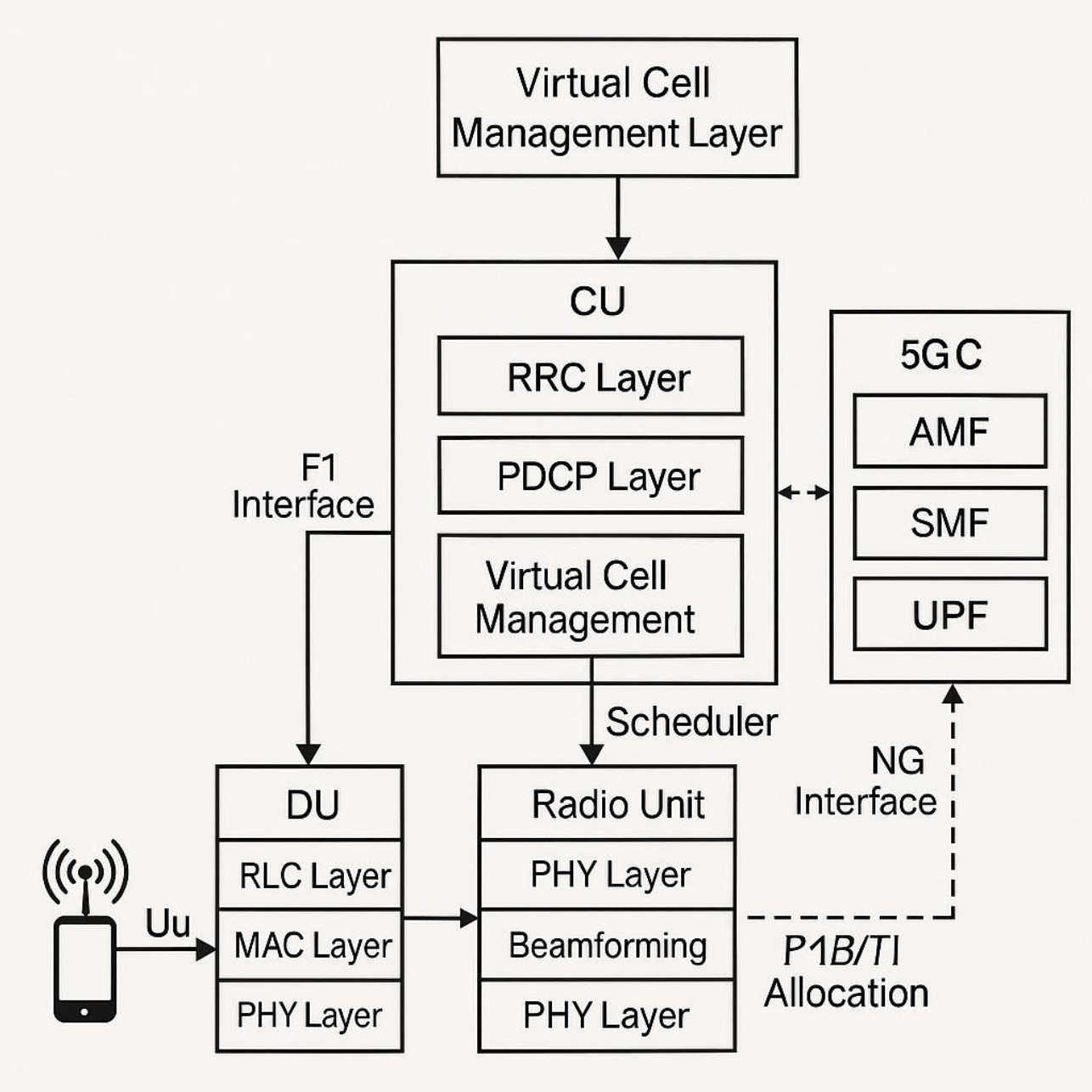


Рис. 1.1. Архітектура мережі 5G NR з розподілом радіоресурсів

Незважаючи на вражаючий прогрес в архітектурі мережі 5G та принципах розподілу ресурсів, залишається кілька проблем, які можуть вплинути на майбутній розвиток та розгортання цих систем. Однією з основних проблем є управління перешкодами, особливо оскільки кілька пристроїв та служб працюють у перекриваючихся діапазонах частот, що призводить до потенційного погіршення

сигналу та зниження ефективності мережі. Проблеми співіснування 5G та існуючих застарілих систем також створюють значні перешкоди, вимагаючи складних методів для мінімізації перешкод та забезпечення безперебійної роботи в різних поколіннях мереж. Крім того, масштабованість створює ще один критичний виклик; оскільки кількість підключених пристроїв продовжує зростати в геометричній прогресії — від смартфонів до датчиків Інтернету речей — мережі повинні розвиватися, щоб обробляти величезні навантаження трафіку без шкоди для продуктивності. Це вимагає інноваційних рішень, які можуть динамічно адаптуватися до середовищ високої щільності, таких як вдосконалене формування променя, спільне використання спектру та інтелектуальне планування. Новітні технології, зокрема штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання, все частіше досліджуються для вирішення цих проблем. Управління ресурсами на основі ШІ пропонує багатообіцяючі перспективи, дозволяючи мережам прогнозувати схеми трафіку, оптимізувати використання спектру, та автономно вирішувати проблеми з перешкодами в режимі реального часу. Оскільки 5G просувається до широкого впровадження, інтеграція цих інтелектуальних методів матиме вирішальне значення для подолання існуючих обмежень та прокладання шляху до більш стійких, ефективних та масштабованих бездротових мереж у майбутньому.

На завершення, еволюція архітектури мережі 5G та принципів розподілу радіоресурсів відображає комплексні зусилля, спрямовані на задоволення зростаючих потреб сучасного бездротового зв'язку. Складна архітектура, що характеризується віртуалізацією та хмарними інноваціями, забезпечує гнучку основу, яка підтримує різноманітні послуги завдяки таким функціям, як сегментація мережі. Ефективне управління радіоресурсами, що охоплює стратегії динамічного розподілу, спільне використання спектра та вдосконалені алгоритми планування, гарантує, що мережа може забезпечувати високу ефективність, справедливість та низьку затримку. Доповнені такими технологіями, як формування променя та масивний MIMO, ці принципи значно підвищують пропускну здатність мережі та покриття, що дозволяє поширювати додатки з інтенсивним використанням даних. Крім того, надійні механізми QoS та

визначення пріоритетів є життєво важливими для підтримки якості послуг у широкому спектрі випадків використання, від Інтернету речей до потокової передачі медіа високої чіткості. Тим не менш, постійні проблеми, такі як управління перешкодами, масштабованість та зростаюча складність екосистем пристроїв, підкреслюють необхідність постійних інновацій. Майбутні напрямки, включаючи управління ресурсами на основі штучного інтелекту, обіцяють вирішити ці проблеми, гарантуючи, що мережі 5G залишатимуться адаптивними, стійкими та здатними підтримувати наступну хвилю технологічного прогресу. Дивлячись у майбутнє, інтеграція інтелектуальних, масштабованих рішень буде важливою для розкриття повного потенціалу технології 5G та формування майбутнього бездротового зв'язку.

1.2. Віртуалізація мережевих функцій та роль SDN/NFV у формуванні віртуальних стільників

У швидкозмінному ландшафті телекомунікацій попит на більш гнучкі, масштабовані та ефективні мережеві архітектури стає все більш критичним. Традиційні мережеві інфраструктури, що залежать від спеціалізованого обладнання та ручного налаштування, часто не відповідають динамічним вимогам сучасного трафіку даних та надання послуг. Щоб подолати ці обмеження, віртуалізація мережевих функцій (NFV) та програмно-визначені мережі (SDN) стали революційними парадигмами, які фундаментально змінюють те, як мережі проектуються, керуються та експлуатуються. Ці технології дозволяють віртуалізувати мережеві функції та централізоване керування, прокладаючи шлях для інноваційних концепцій, таких як віртуальні комірки — динамічні, адаптивні сегменти мережі, які оптимізують використання ресурсів та покращують взаємодію з користувачем. У цьому есе досліджуються основні принципи NFV, її інтеграція з SDN та їхня спільна роль у створенні віртуальних комірок, які стають ключовими у розвитку мереж наступного покоління [5].

Віртуалізація мережевих функцій (NFV) являє собою зміну парадигми від традиційних апаратно-орієнтованих мережевих архітектур до програмно-орієнтованих мережевих функцій. По суті, NFV передбачає відокремлення мережевих функцій, таких як маршрутизація, брандмауери та балансування навантаження, від виділених апаратних пристроїв та розгортання їх як віртуалізованих екземплярів програмного забезпечення на спільних серверах. Архітектура NFV складається з ключових компонентів, включаючи віртуальні мережеві функції (VNF), інфраструктуру NFV (NFVI) та системи управління та оркестрації (MANO). VNF – це програмні реалізації мережевих функцій, тоді як NFVI надає апаратні та програмні ресурси, необхідні для розміщення VNF, забезпечуючи масштабованість та гнучкість. Рівень управління та оркестрації координує розгортання, управління життєвим циклом та ланцюгове надання послуг VNF. Порівняно з традиційними мережами, які залежать від спеціалізованого обладнання, NFV пропонує значні переваги: швидке розгортання послуг, зниження капітальних та операційних витрат, а також підвищену гнучкість адаптації до коливань попиту. Наприклад, оператори зв'язку можуть швидко впроваджувати нові послуги або масштабувати існуючі без заміни фізичної інфраструктури, тим самим прискорюючи час виходу на ринок та покращуючи інновації в сфері послуг. Програмно-визначені мережі (SDN) доповнюють NFV, забезпечуючи централізовану, програмовану площину керування, яка абстрагує базову фізичну мережеву інфраструктуру. Принципи SDN зосереджені на відділенні площини керування — прийняття рішень про те, куди надсилається трафік — від площини даних, яка обробляє фактичну пересилку пакетів. Архітектурно SDN використовує централізований контролер, який підтримує глобальне уявлення про мережу та взаємодіє з мережевими пристроями через стандартизовані протоколи, такі як OpenFlow. Таке розділення дозволяє динамічно, детально контролювати мережеві ресурси, дозволяючи мережевим адміністраторам впроваджувати політики та вносити корективи в режимі реального часу. При інтеграції з NFV SDN підвищує гнучкість мережі, забезпечуючи динамічне забезпечення та модифікацію мережевих функцій, що

відповідає гнучкому розгортанню VNF. Наприклад, централізоване керування SDN дозволяє швидко перенаправляти трафік у відповідь на перевантаження або збої, забезпечуючи високу доступність та якість обслуговування. Крім того, SDN сприяє автоматизації та оркестрації, зменшуючи ручне втручання та мінімізуючи помилки конфігурації, що є критично важливим для управління складними віртуалізованими середовищами з кількома постачальниками. Концепція віртуальних комірок у сучасних бездротових мережах уособлює синергію NFV та SDN у створенні адаптивних, ефективних та високопродуктивних сегментів мережі. Віртуальні комірки – це динамічно створені мережеві зони, які можна адаптувати до конкретних вимог до послуг, географічних районів або щільності користувачів, по суті функціонуючи як «мікромережі» в межах більшої стільникової інфраструктури. NFV відіграє життєво важливу роль, забезпечуючи створення, масштабування та управління цими віртуальними комірок шляхом розгортання VNF, які можна створювати на вимогу, забезпечуючи індивідуальні мережеві функції, такі як локалізоване кешування або спеціалізована маршрутизація. Ця гнучкість дозволяє операторам оптимізувати розподіл ресурсів на основі попиту в режимі реального часу, покращуючи покриття та ємність. SDN доповнює цей процес, координуючи розгортання та роботу віртуальних комірок за допомогою централізованого керування, забезпечуючи безперебійну інтеграцію та координацію між кількома віртуальними комірок. Наприклад, у перевантаженому міському середовищі SDN може динамічно створювати додаткові віртуальні комірки для обслуговування районів з високою щільністю, балансуючи навантаження та підтримуючи якість обслуговування. Така оркестрація не лише підвищує ефективність мережі, але й підтримує інноваційні варіанти використання, такі як зв'язок «транспортне засіб-все» (V2X) та розгортання Інтернету речей, де швидке, локалізоване налаштування мережі є важливим [6].

Розгортання віртуальних комірок через NFV та SDN пропонує численні переваги, які значно розширюють можливості сучасних мереж. Однією з основних переваг є покращена масштабованість та використання ресурсів; віртуальні комірки можна динамічно створювати, розширювати або скорочувати на основі

потреб мережі в режимі реального часу, що дозволяє операторам оптимізувати використання доступного обладнання та спектру. Ця гнучкість гарантує ефективний розподіл мережевих ресурсів, зменшуючи втрати та забезпечуючи економічно ефективне розширення, особливо в густонаселених районах або в години пікового навантаження. Крім того, поєднання NFV та SDN значно підвищує гнучкість мережі, забезпечуючи швидке надання послуг та модифікації без необхідності зміни фізичного обладнання. Наприклад, нову віртуальну комірку можна розгорнути протягом кількох хвилин для підтримки спеціальної події або вирішення локальних перевантажень, що сприяє швидкому реагуванню на потреби користувачів та вимоги ринку. Безпека також підвищується завдяки централізованому керуванню та програмованості; SDN дозволяє послідовно застосовувати політики, виявляти загрози в режимі реального часу та швидко ізолювати скомпрометовані сегменти, тоді як модульна архітектура NFV спрощує оновлення та виправлення. Крім того, обслуговування мережі стає простішим, оскільки віртуалізованими функціями можна керувати дистанційно, що зменшує потребу в втручанні на місці та мінімізує час простою. Ці сукупні переваги позиціонують NFV та SDN як трансформаційні технології, що дозволяють операторам створювати більш стійкі, ефективні та адаптивні віртуальні стільникові мережі.

Незважаючи на ці багатообіцяючі переваги, для повної реалізації потенціалу NFV та SDN у розгортанні віртуальних стільникових мереж необхідно вирішити кілька проблем та майбутніх напрямків. Технічно такі проблеми, як затримка, залишаються проблемою, оскільки шари віртуалізації та централізоване керування можуть призводити до затримок, які впливають на програми реального часу, такі як автономне водіння або доповнена реальність. Взаємодія та стандартизація також створюють значні перешкоди, оскільки різні постачальники обладнання та програмні платформи повинні безперебійно працювати разом, щоб забезпечити стабільну продуктивність. Без поширених стандартів фрагментація може перешкоджати взаємодії та уповільнювати інновації. Проблеми безпеки посилюються у віртуалізованих середовищах; централізовані точки керування

стають привабливими цілями для кібератак, а вразливості у VNF або на рівні оркестрації можуть поставити під загрозу цілі мережі. Щоб зменшити ці ризики, поточні дослідження зосереджені на розробці надійних протоколів безпеки та систем виявлення вторгнень, адаптованих для віртуалізованих мереж. У майбутньому нові тенденції включають інтеграцію штучного інтелекту для автономного управління мережами, розробку ефективніших алгоритмів оркестрації та дослідження парадигм периферійних обчислень, щоб наблизити віртуальні комірки до кінцевих користувачів. Ці досягнення спрямовані на усунення поточних обмежень та розблокування нових застосувань, забезпечуючи подальший розвиток NFV та SDN як життєво важливих компонентів майбутніх бездротових та стільникових мереж.

Таблиця 1.2. подає структуровану характеристику ключових аспектів віртуалізації мережевих функцій у контексті застосування SDN та NFV для формування віртуальних стільників у мережах 5G. У ній відображено принципи роботи SDN з централізованим керуванням трафіком, можливості NFV щодо перенесення функцій gNB та елементів 5G Core у програмно-визначене середовище, а також наведено, яким чином ці технології забезпечують гнучке створення та масштабування віртуальних стільників. Таблиця висвітлює переваги програмної конфігурації радіоресурсів, балансування навантаження, адаптивного beamforming та динамічної зміни зони покриття, що дозволяє підвищити ефективність роботи мережі та забезпечити стійкість у сценаріях із високою щільністю користувачів [7].

На завершення, віртуалізація мережевих функцій та програмно-визначені мережі революціонізували архітектуру сучасних мереж, забезпечивши віртуалізацію функцій та централізовані механізми керування. Ці технології сприяють створенню віртуальних комірок, які є гнучкими, масштабованими та ефективними сегментами мережі, адаптованими до конкретних потреб, тим самим значно підвищуючи продуктивність мережі та використання ресурсів. Інтеграція NFV та SDN пропонує численні переваги, включаючи покращену масштабованість, швидке розгортання послуг, підвищену безпеку та спрощене

обслуговування, що робить їх незамінними для мереж наступного покоління. Однак, для повного використання їхнього потенціалу необхідно вирішити такі проблеми, як проблеми затримки, сумісності, стандартизації та вразливості безпеки.

Таблиця 1.2.

Віртуалізація мережевих функцій та роль SDN/NFV у формуванні віртуальних стільників

Параметр	Характеристика
SDN у мобільних мережах	Відокремлення площини керування від площини даних для централізованого управління трафіком та політиками.
NFV	Віртуалізація мережевих функцій (gNB-CU, gNB-DU, AMF, SMF) у вигляді програмних модулів на універсальному обладнанні.
Переваги SDN/NFV	Гнучкість, масштабованість, швидке розгортання функцій та зменшення витрат на інфраструктуру.
Віртуальні стільники	Логічні стільники, що формуються програмно та можуть змінювати форму і радіус залежно від навантаження.
Роль SDN у формуванні віртуальних стільників	Централізований контролер керує ресурсами, пріоритетами та маршрутизацією користувачів між стільниками.
Роль NFV у формуванні віртуальних стільників	Віртуалізовані CU/DU дозволяють динамічно створювати або масштабувати стільники без прив'язки до фізичного обладнання.
Оптимізація радіоресурсів	Гнучке виділення PRB, формування beamforming та балансування між стільниками програмними методами.
Підтримка високої щільності користувачів	Віртуальні стільники дозволяють перерозподіляти навантаження в режимі реального часу.

Поточні дослідження та нові технологічні тенденції обіцяють подолати ці перешкоди та прокласти шлях для більш інтелектуальних, автономних та стійких віртуальних стільникових мереж. Оскільки ці інновації продовжують розвиватися,

NFV та SDN, безсумнівно, відіграватимуть вирішальну роль у формуванні майбутнього бездротового зв'язку, забезпечуючи більш адаптивні та орієнтовані на користувача рішення для підключення в усьому світі.

1.3. Принцип роботи віртуальних стільників, їх структура та механізми адаптивного управління

У швидкозмінному ландшафті інформаційних технологій віртуальні комірки стали ключовою концепцією для підвищення обчислювальної ефективності, масштабованості та гнучкості. Ці віртуальні структури, натхненні біологічними клітинами, служать фундаментальними одиницями у більших цифрових екосистемах, сприяючи складній обробці даних та управлінню системами. На відміну від своїх біологічних аналогів, віртуальні комірки є повністю цифровими конструкціями, які спираються на передові технології віртуалізації для моделювання біологічних функцій та взаємодій. Розуміння структури, принципів роботи та адаптивних механізмів керування віртуальними комірок є важливим для використання їхнього повного потенціалу в сучасних обчислювальних середовищах. У цьому есе досліджується складна архітектура віртуальних комірок, пояснюються процеси, що керують їхньою роботою, та розглядаються складні системи керування, які забезпечують їхню адаптивність у динамічних технологічних ландшафтах [8].

Структура віртуальних комірок складається з різних компонентів, які разом підтримують їхню функціональність у цифрових системах. Центральним елементом цієї архітектури є обчислювальні блоки, що включають віртуальні процесори, модулі пам'яті та сховища даних, що зберігають та керують інформацією. Ці компоненти віртуалізуються за допомогою гіпервізорів або технологій контейнеризації, що дозволяє кільком віртуальним комірам співіснувати на одній фізичній апаратній платформі без перешкод. Відображення віртуальних комірок на фізичне обладнання передбачає складні алгоритми розподілу ресурсів, які забезпечують оптимальне використання та продуктивність.

На відміну від біологічних клітин, які мають складну внутрішню організацію органел та мембран, віртуальні комірки характеризуються модульною та гнучкою конструкцією, де кожен компонент можна динамічно налаштовувати або замінювати за потреби. Ця структурна відмінність підкреслює адаптивність та масштабованість, властиві віртуальним комірам, що робить їх придатними для різноманітних застосувань, від хмарних обчислень до систем штучного інтелекту. Наприклад, у хмарних середовищах віртуальні комірки можна адаптувати до певних робочих навантажень, забезпечуючи ефективну обробку та безпеку даних.

Принцип роботи віртуальної комірки полягає в обробці та управлінні даними за допомогою серії взаємопов'язаних кроків. По суті, дані надходять до віртуальної комірки через зовнішні інтерфейси, такі як API або мережеві з'єднання, та обробляються у віртуалізованому середовищі спеціалізованими обчислювальними блоками. Цей процес включає виконання алгоритмів, керування потоком даних та генерацію виходів, які передаються до зовнішніх систем або інших віртуальних комірок. Взаємодія між віртуальними комірками та зовнішніми системами здійснюється за допомогою стандартизованих протоколів зв'язку, що забезпечує безперебійну інтеграцію та сумісність на різних платформах. Технологія віртуалізації відіграє тут вирішальну роль, забезпечуючи рівень абстракції, який ізолює віртуальні комірки від складних апаратних засобів. Цей рівень дозволяє динамічно розгортати, мігрувати та масштабувати віртуальні комірки для задоволення коливальних потреб, подібно до того, як біологічні клітини адаптуються до подразників навколишнього середовища. Наприклад, у центрах обробки даних віртуальні комірки динамічно коригують свої обчислювальні можливості для обробки різних рівнів навантаження, забезпечуючи стабільну продуктивність та ефективність використання ресурсів [9].

Схема (рис. 1.2) ілюструє принципову різницю між традиційною архітектурою стільникових мереж та концепцією віртуальних стільників у 5G. У звичайній системі кожен фізичний стільник має власну базову станцію й чітко визначені межі покриття, через що користувач під час переміщення постійно

переходить між стільниками, створюючи хендовери та збільшуючи інтерференцію на межах зон. У віртуальній архітектурі фізичні стільники об’єднуються у єдиний логічний простір, яким керує централізований блок CU, тому користувач сприймається мережею як такий, що знаходиться в одному «віртуальному» стільнику, без частих хендоверів і з можливістю адаптивного розподілу ресурсів. Головна різниця полягає в тому, що у традиційній моделі покриття визначається фізичним розташуванням базових станцій, тоді як у віртуальній — формується програмно й може динамічно змінюватися відповідно до навантаження та умов радіосередовища.

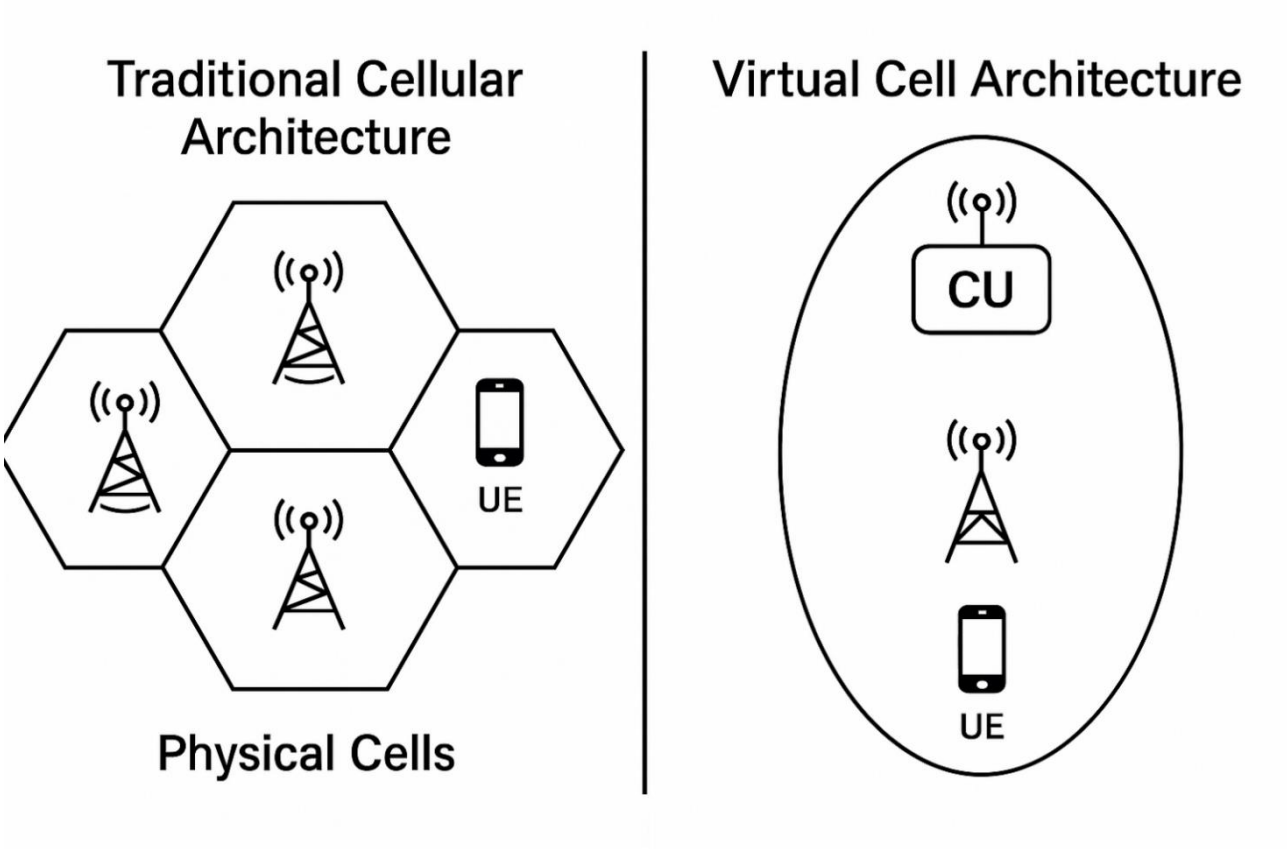


Рис. 1.2. Порівняння традиційного фізичного стільника та віртуального стільника в мережах 5G

Адаптивні механізми керування життєво важливі для підтримки ефективності та стійкості віртуальних комірок у мінливих умовах експлуатації. Ці механізми значною мірою залежать від складних алгоритмів, призначених для

моніторингу показників продуктивності, прогнозування майбутніх потреб та впровадження необхідних коригувань. Наприклад, алгоритми машинного навчання аналізують історичні дані для оптимізації розподілу ресурсів, зменшення затримки та споживання енергії, одночасно максимізуючи пропускну здатність. Динамічний розподіл ресурсів – це ще один ключовий аспект, де такі ресурси, як час процесора, пам'ять і пропускна здатність, перерозподіляються в режимі реального часу залежно від вимог до робочого навантаження. Ця гнучкість гарантує, що віртуальні комірки можуть масштабуватися вгору або вниз без ручного втручання, підтримуючи оптимальну продуктивність. Системи зворотного зв'язку ще більше підвищують адаптивність, надаючи безперервний вхідний сигнал про робочий стан, дозволяючи віртуальним коміркам проактивно реагувати на зміни навколишнього середовища. Наприклад, віртуальна комірка, яка керує аналітикою в режимі реального часу, може автоматично виділяти більше ресурсів у години пікового використання та зменшувати їх у години поза піковим навантаженням, забезпечуючи ефективність та економічну вигідність. У сукупності ці адаптивні механізми керування втілюють інтелект, вбудований у віртуальні комірки, дозволяючи їм працювати автономно та надійно в складних цифрових екосистемах.

Ефективна комунікація та безперешкодна інтеграція є важливими для оптимального функціонування віртуальних комірок у складних цифрових екосистемах. Кілька віртуальних комірок взаємодіють за допомогою стандартизованих протоколів обміну повідомленнями, таких як RESTful API, черги повідомлень або механізми міжпроцесної комунікації, які сприяють обміну даними, командами та оновленнями стану. Ці методи комунікації дозволяють віртуальним коміркам координувати діяльність, спільно використовувати ресурси та співпрацювати над завданнями, тим самим підвищуючи ефективність та стійкість системи. Інтеграція віртуальних комірок у більші обчислювальні системи передбачає їх розгортання в хмарних архітектурах, розподілених системах або корпоративних мережах, де вони функціонують як модульні одиниці, що сприяють загальним процесам. Для підтримки цілісності та безпеки даних під

час взаємодії використовуються надійні протоколи шифрування, засоби контролю доступу та механізми автентифікації, що гарантує захист конфіденційної інформації від несанкціонованого доступу або втручання. Крім того, для синхронізації даних між кількома віртуальними комірок впроваджуються моделі узгодженості, такі як кінцева узгодженість або сильна узгодженість. Наприклад, у розподілених системах баз даних віртуальні комірки, що працюють разом, повинні синхронізувати оновлення, щоб запобігти розбіжностям у даних, тим самим підтримуючи цілісність та безпеку системи.

Незважаючи на свої значні переваги, сучасні архітектури віртуальних комірок стикаються з кількома обмеженнями, які перешкоджають їхньому повному потенціалу. Проблеми включають проблеми, пов'язані з масштабованістю, затримкою, фрагментацією ресурсів та складністю управління численними взаємопов'язаними віртуальними об'єктами. Зі збільшенням кількості віртуальних комірок забезпечення ефективної комунікації та уникнення вузьких місць стає все складнішим, що часто вимагає складних інструментів оркестрації. Крім того, існуючі адаптивні механізми керування, хоча й ефективні, все ще мають потенціал для вдосконалення, зокрема, для точнішого прогнозування коливань робочого навантаження та мінімізації втрат ресурсів. Майбутні досягнення в галузі штучного інтелекту та машинного навчання обіцяють подальше вдосконалення цих систем керування, дозволяючи віртуальним комірам навчатися на операційних моделях та проактивно оптимізувати свої реакції. Новітні технології, такі як периферійні обчислення, квантові обчислення та досягнення в апаратному забезпеченні віртуалізації, готові вплинути на еволюцію роботи віртуальних комірок, забезпечуючи більш автономні, ефективні та стійкі системи. Наприклад, інтеграція прийняття рішень на основі штучного інтелекту з віртуалізованим середовищем може призвести до створення систем самовідновлення, здатних діагностувати та вирішувати проблеми без втручання людини, тим самим значно покращуючи загальну стійкість та продуктивність системи.

На завершення, віртуальні комірки являють собою складне поєднання біологічного натхнення та передової технології віртуалізації, розроблене для підвищення гнучкості, масштабованості та ефективності сучасних цифрових систем. Їхня складна структура, що включає віртуалізовані обчислювальні блоки та сховища даних, дозволяє динамічне розподілення та модульні налаштування, адаптовані до конкретних потреб. Принципи їхньої роботи, зосереджені на обробці даних, взаємодії із зовнішніми системами та віртуалізації, сприяють безперешкодній інтеграції та взаємодії в рамках більших обчислювальних систем. Адаптивні механізми керування, керовані інтелектуальними алгоритмами та системами зворотного зв'язку, гарантують, що віртуальні комірки можуть проактивно реагувати на зміну робочих навантажень та умов навколишнього середовища, підтримуючи оптимальну продуктивність. Незважаючи на сучасні проблеми, пов'язані з масштабованістю та складністю управління, постійні технологічні інновації обіцяють розширити межі можливостей віртуальних комірок. Оскільки нові технології продовжують формувати їхню еволюцію, віртуальні комірки готові стати ще більш автономними, ефективними та невід'ємною частиною майбутніх цифрових екосистем, трансформуючи те, як обчислювальні ресурси управляються та використовуються в різних додатках.

1.4. Переваги використання технологій 5G

Поява бездротової технології п'ятого покоління (5G) знаменує собою переломний момент у сфері цифрового зв'язку. Обіцяючи безпрецедентні швидкості, меншу затримку та більшу пропускну здатність мережі, 5G готовий революціонізувати спосіб підключення та роботи окремих осіб та галузей промисловості. Його впровадження виходить за рамки простого швидшого Інтернету; воно пропонує значні покращення, які можуть вплинути на різні сектори, від повсякденного використання мобільних пристроїв до складних промислових та медичних застосувань. Досліджуються основні переваги технології 5G, зосереджуючись на її здатності забезпечувати покращене мобільне

підключення та швидкість, сприяти розширенню Інтернету речей (IoT) та каталізувати прогрес у сфері медичних послуг [10].

Однією з найбільш очевидних та помітних переваг технології 5G є її здатність забезпечувати значно покращене мобільне з’єднання та швидкість. Порівняно з 4G та попередніми поколіннями, 5G пропонує експоненціально вищу швидкість передачі даних, яка потенційно досягає 20 гігабіт на секунду за оптимальних умов. Це означає, що завдання, які колись займали хвилини, такі як завантаження фільмів високої чіткості або великих оновлень програмного забезпечення, тепер можна виконати за лічені секунди. Крім того, 5G значно зменшує затримку, тобто затримку між надсиланням запиту та отриманням відповіді, часто до менш ніж однієї мілісекунди. Це скорочення є критично важливим для програм, що потребують взаємодії в реальному часі, таких як прямі трансляції, онлайн-ігри, віртуальна та доповнена реальність, які для безперебійної роботи залежать від миттєвої передачі даних. Крім того, покращена надійність та пропускна здатність мережі 5G дозволяють їй одночасно обробляти величезну кількість підключених пристроїв — за оцінками, до одного мільйона пристроїв на квадратний кілометр — таким чином підтримуючи зростаючу екосистему смартфонів, планшетів, пристроїв Інтернету речей та підключених транспортних засобів. Наприклад, розумні міста, що впроваджують 5G, можуть ефективно керувати потоками транспорту, системами громадської безпеки та споживанням енергії без перевантаження мережі, що ілюструє, як надійність 5G покращує загальну зв'язок.

Розвиток та поширення Інтернету речей (IoT) можуть отримати величезну користь від можливостей технології 5G. IoT – це взаємопов'язана мережа фізичних пристроїв, вбудованих датчиками та програмним забезпеченням, які обмінюються даними. Завдяки вищій пропускній здатності та меншій затримці 5G, розгортання розумніших будинків стає більш доцільним та ефективним. Підключені прилади, такі як холодильники, що контролюють терміни придатності, або термостати, що адаптуються до звичок мешканців, можуть працювати плавніше та миттєво реагувати на команди користувача. У промисловому секторі 5G сприяє передовій

автоматизації та інтелектуальним виробничим процесам, де роботизовані системи та обладнання можуть координувати свою роботу в режимі реального часу, мінімізуючи затримки та помилки. Наприклад, фабрики, оснащені датчиками з підтримкою 5G, можуть миттєво виявляти несправності обладнання, що дозволяє проводити прогнозне обслуговування, яке зменшує час простою та експлуатаційні витрати. Крім того, портативні пристрої для здоров'я та фітнесу, такі як розумні годинники та патчі для дистанційного моніторингу, можуть безперервно та надійно передавати життєво важливі дані про здоров'я медичним працівникам, що дозволяє вживати проактивних заходів. Таке широке підключення не лише покращує спосіб життя людей, але й підвищує ефективність та продуктивність у різних галузях, перетворюючи повсякденне середовище на взаємопов'язані, інтелектуальні системи, як показано в табл. 1.3.

Таблиця 1.3.

Переваги використання технологій 5G

Категорія переваг	Опис та технічне обґрунтування
Висока швидкість передачі даних	Досягнення пікових швидкостей 10–20 Гбіт/с у стандарті 5G NR та до 40 Гбіт/с у 5G Advanced завдяки ширшим смугам спектра (100–400 МГц) та агрегації частот.
Наднизька затримка (Latency)	Скорочення затримки до 1–10 мс (та менше 1 мс у 5G Advanced), що є критичним для сервісів реального часу, таких як URLLC та автономний транспорт.
Масштабованість та місткість	Підтримка масового підключення пристроїв (mMTC) завдяки технологіям Massive MIMO (від 64T64R до 128T128R+) та просторовому мультиплексуванню.
Гнучкість через віртуалізацію	Можливість динамічного створення "мікромереж" або віртуальних стільників за допомогою SDN та NFV, що адаптуються до навантаження без зміни фізичного обладнання.
Ефективність управління спектром	Використання широкого діапазону частот (від <6 ГГц до міліметрових хвиль) та інтелектуальне спільне використання спектра для оптимізації покриття та ємності.
Покращення якості зв'язку (QoS/QoE)	Використання адаптивного формування променя (Beamforming) для фокусування енергії на конкретному користувачі, що покращує SINR та мінімізує інтерференцію.
Економічна та	Зниження капітальних витрат (CapEx) через використання

операційна ефективність	хмарної інфраструктури (NFV) та спрощення обслуговування завдяки централізованому програмному управлінню.

Мабуть, найголовніше те, що технологія 5G має революціонізувати медичні послуги, забезпечуючи нові рівні телемедицини та дистанційної допомоги. Високоякісні відеоконсультації в режимі реального часу стають більш практичними та доступними, дозволяючи лікарям точно оцінювати стан пацієнтів з віддалених місць. Наприклад, у сільській місцевості або недостатньо обслуговуваних районах, де медичних спеціалістів мало, 5G може забезпечити миттєве відеозв'язок високої чіткості, що імітує особисті огляди, зменшуючи потребу у фізичних поїздках та пришвидшуючи діагностику. Крім того, дистанційний моніторинг пацієнтів покращується завдяки підключеним медичним пристроям, таким як носимі датчики, які постійно відстежують життєво важливі показники, такі як частота серцевих скорочень, артеріальний тиск та насичення крові киснем. Ці дані в режимі реального часу можна миттєво передавати медичним працівникам, що дозволяє швидше реагувати на критичні зміни у здоров'ї пацієнтів. Крім того, можливості швидкого обміну даними 5G підтримують ефективнішу співпрацю між міждисциплінарними командами, покращуючи точність діагностики та плани лікування. Лікарні також можуть використовувати 5G для швидкої передачі великих файлів медичних зображень, пришвидшуючи діагностику та лікування. Загалом, інтеграція 5G у системи охорони здоров'я обіцяє зробити медичні послуги доступнішими, ефективнішими та персоналізованішими, що зрештою рятуватиме життя та покращуватиме стан здоров'я [11].

Окрім впливу на окремих користувачів та охорону здоров'я, технологія 5G готова революціонізувати транспортні системи та розвиток розумних міст. Автономні транспортні засоби, які значною мірою залежать від обробки даних у режимі реального часу, отримають значну користь від низької затримки та високошвидкісного підключення 5G. Автономні автомобілі можуть миттєво взаємодіяти один з одним та з дорожньою інфраструктурою, забезпечуючи

безпечнішу навігацію, уникнення зіткнень та оптимізовану маршрутизацію. Наприклад, транспортні засоби, оснащені 5G, можуть отримувати оновлення в режимі реального часу про дорожні умови, небезпеки та схеми руху, що дозволяє їм приймати негайні рішення, що підвищують безпеку та ефективність. Крім того, інтелектуальні системи управління дорожнім рухом використовують 5G для динамічного моніторингу та контролю міського транспортного потоку, зменшуючи затори в години пік та мінімізуючи викиди. Ці системи використовують підключені датчики та камери для аналізу дорожнього руху та проактивного коригування світлофорів або зміни маршруту транспортних засобів. Громадська безпека також виграє від підключених служб спостереження та екстреної допомоги з підтримкою 5G; камери спостереження з високошвидкісним підключенням можуть миттєво передавати відео високої чіткості правоохоронним органам, що сприяє швидшому реагуванню та кращій обізнаності про ситуацію. Служби екстреної допомоги, оснащені пристроями, підключеними до 5G, можуть ефективніше координувати реагування, надаючи своєчасну допомогу під час криз. Загалом, роль 5G у трансформації транспорту та міського управління сприяє безпечнішим, ефективнішим та екологічно сталим містам.

Поява технології 5G також стимулює інновації, підтримуючи нові технології, такі як доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR). Ці захопливі враження залежать від швидкої передачі даних та низької затримки для безперебійного функціонування, що 5G легко забезпечує. Наприклад, в іграх гравці можуть насолоджуватися взаємодією в реальному часі у високодеталізованих віртуальних світах без затримок, створюючи більш захопливий та реалістичний досвід. В освіті AR та VR дозволяють проводити інтерактивні уроки, віртуальні екскурсії та віддалені лабораторні експерименти, які оживляють предмети, долаючи географічні бар'єри та збагачуючи навчальне середовище. Індустрія розваг також отримує вигоду від віртуальних концертів у реальному часі, захопливих розповідей історій та покращеного мультимедійного досвіду, який захоплює аудиторію в усьому світі. Крім того, 5G прискорює дослідження та розробки в галузі штучного інтелекту (ШІ), забезпечуючи

необхідну інфраструктуру для збору та обробки великомасштабних даних. Швидша передача даних сприяє навчанню складних моделей ШІ, а потоки даних у реальному часі дозволяють системам ШІ приймати миттєві рішення в таких сферах, як робототехніка, розумне виробництво та персоналізована охорона здоров'я. Загалом, можливості 5G відкривають нові можливості для технологічного прогресу, сприяють інноваціям у багатьох галузях та надихають на хвилю креативних застосувань.

Окрім технологічних та соціальних переваг, технологія 5G має значні перспективи для економічного зростання та створення нових бізнес-можливостей. Розгортання 5G має потенціал стимулювати появу абсолютно нових ринків та галузей, зосереджених навколо послуг та продуктів на базі 5G. Наприклад, підприємства, які розробляють підключені пристрої, розумну інфраструктуру та хмарні сервіси, знайдуть нові шляхи для розширення. Підвищення ефективності, зумовлене високошвидкісним підключенням та низькою затримкою 5G, призводить до підвищення продуктивності в різних секторах, включаючи виробництво, логістику, роздрібну торгівлю та фінанси. Компанії можуть автоматизувати процеси, покращити управління ланцюгами поставок та ефективніше надавати персоналізований досвід клієнтам. Більше того, розгортання 5G приваблює інвестиції як з боку урядів, так і з боку приватного сектору, які прагнуть скористатися його трансформаційним потенціалом, сприяючи розвитку динамічної екосистеми технологічного підприємництва. Стартапи та вже існуючі компанії зацікавлені в інноваціях, розробці нових програм та дослідженні креативних застосувань технології 5G, що зрештою прискорює економічний розвиток та створення робочих місць. Як каталізатор модернізації, 5G не лише покращує існуючі галузі, але й прокладає шлях для абсолютно нових економічних парадигм, заснованих на цифровому зв'язку [12].

Незважаючи на численні переваги технології 5G, її розгортання створює кілька суттєвих проблем та проблем, які потребують ретельного розгляду. Однією з основних перешкод є значні витрати на інфраструктуру, необхідні для створення комплексної мережі 5G. На відміну від попередніх поколінь, 5G спирається на

густу мережу малих стільникових антен та розгалужених волоконно-оптичних з'єднань, що вимагає широкого встановлення в міських та сільських районах. Цей процес вимагає значних інвестицій від урядів та приватних компаній, що може уповільнити розгортання або призвести до нерівності в покритті. Крім того, оскільки 5G стає все більш поширеним, вразливості кібербезпеки стають критичною проблемою. Збільшення зв'язку та обміну даними відкриває нові можливості для кібератак, витоків даних та зловмисного втручання, що потенційно може поставити під загрозу конфіденційну інформацію та критично важливі системи. Забезпечення надійних заходів безпеки є важливим для захисту користувачів та інфраструктури. Крім того, також висловлювалися побоювання щодо конфіденційності та здоров'я. Поширення електромагнітних сигналів, пов'язаних з 5G, викликало дебати щодо потенційних ризиків для здоров'я, хоча науковий консенсус залишається непереконливим. Проблеми конфіденційності виникають через величезну кількість персональних даних, що передаються через мережі 5G, що ставить під сумнів захист даних та згоду користувачів. Вирішення цих проблем вимагає комплексної політики, технологічних гарантій та обізнаності громадськості, щоб максимізувати переваги 5G. мінімізуючи ризики.

Ще один важливий аспект потенційного впливу 5G полягає в його здатності подолати цифровий розрив, особливо в сільській місцевості та районах з недостатнім рівнем обслуговування. Історично обмежений доступ до Інтернету маргіналізував ці громади, обмежуючи їхні можливості для освіти, охорони здоров'я та економічного розвитку. Розгортання 5G пропонує перспективне рішення для покращення зв'язку в цих регіонах, надаючи швидші та надійніші інтернет-послуги. Покращений доступ може підтримати сільський бізнес, дозволяючи їм більш повно брати участь у цифровій комерції, охоплювати ширші ринки та впроваджувати інноваційні технології, що підвищують продуктивність. Крім того, покращений зв'язок може розширити освітні можливості завдяки платформам дистанційного навчання, віртуальним класам та цифровим ресурсам, які особливо цінні у віддалених місцях, де фізична інфраструктура, така як школи та бібліотеки, обмежена. Сприяючи рівному доступу до цифрових послуг, 5G

може сприяти соціальній інтеграції та економічному розвитку, допомагаючи зменшити нерівність між міським та сільським населенням. Політики та зацікавлені сторони повинні пріоритезувати інвестиції в сільську інфраструктуру та розробляти стратегії, щоб забезпечити широке використання переваг 5G, що зрештою сприятиме більш збалансованій та інклюзивній цифровій економіці.

На завершення, технологія 5G являє собою новаторський прорив з потенціалом для значного покращення мобільного зв'язку, розвитку Інтернету речей, революціонізування охорони здоров'я та трансформації міського транспорту та ініціатив «розумного міста». Вона також стимулює інновації, стимулює економічне зростання та створює нові бізнес-можливості в різних секторах. Однак ці переваги супроводжуються значними викликами, включаючи високі витрати на інфраструктуру, загрози кібербезпеці, проблеми конфіденційності та дебати щодо охорони здоров'я. Більше того, розгортання 5G пропонує вирішальну можливість подолати цифровий розрив, розширивши доступ до високошвидкісного Інтернету для сільських та малозабезпечених громад, сприяючи більш справедливому соціальному та економічному розвитку. У міру того, як суспільство рухається вперед, важливо продумано вирішувати пов'язані з цим ризики, використовуючи трансформаційну силу 5G для створення більш пов'язаного, інноваційного та інклюзивного майбутнього. Успішна інтеграція 5G залежить не лише від технологічного прогресу, але й від стратегічного планування, регулювання та співпраці між зацікавленими сторонами в усьому світі.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІРТУАЛЬНИХ СТІЛЬНИКІВ

2.1. Вибір ключових метрик і параметрів продуктивності для оцінювання ефективності роботи віртуальних стільників у мережах 5G

Оскільки мережі 5G продовжують розвиватися, розгортання віртуальних комірок, також відомих як мережеве сегментування або віртуалізовані базові станції, стало наріжним каменем для досягнення гнучких, високопродуктивних та низькозатримувальних послуг, обіцяних бездротовим зв'язком наступного покоління. На відміну від традиційних стільникових архітектур, віртуальні комірки працюють за допомогою програмно-визначених механізмів, що дозволяє динамічно розподіляти ресурси та надавати індивідуальні послуги. Для ефективної оцінки продуктивності цих віртуальних об'єктів вкрай важливо вибрати відповідні показники, які всебічно відображають їхні експлуатаційні можливості. У цьому есе досліджуються критичні параметри для оцінки ємності та пропускної здатності мережі, надійності та покриття, а також енергоефективності, підкреслюючи їхню актуальність та застосування в оптимізації продуктивності віртуальних комірок 5G.

Оцінка пропускної здатності та пропускної здатності мережі формує основу для розуміння ефективності віртуальних комірок у наданні високошвидкісних послуг передачі даних. Серед них пропускна здатність залишається найбільш прямим та впливовим показником, що вимірює обсяг даних, успішно переданих мережею протягом певного періоду часу. Висока пропускна здатність означає ефективне використання спектральних ресурсів та здатність підтримувати програми, що потребують інтенсивного використання пропускної здатності, такі як потокове передавання 4K, віртуальна реальність та хмарні ігри. Такі показники, як спектральна ефективність, виражена в бітах за секунду на герц, кількісно визначають, наскільки ефективно використовується доступний спектр, надаючи уявлення про якість радіоінтерфейсу. Наприклад, спектральна ефективність 4

біти/сек/Гц вказує на надійне з'єднання, здатне одночасно підтримувати кількох користувачів [13].

Рис. 2.1 демонструє ключові групи метрик, які використовують для оцінювання ефективності роботи віртуальних стільників у мережах 5G. У ньому виділено показники пропускної здатності, надійності покриття, мобільності користувачів та енергоефективності, що дозволяє комплексно охопити всі критично важливі характеристики мережі.



Рис. 2.1. Класифікація метрик оцінювання ефективності віртуальних стільників 5G

Крім того, показники швидкості передачі даних, такі як пікова, середня та специфічна для комірки швидкість передачі даних, пропонують практичні орієнтири для взаємодії з користувачем. Окрім сирої пропускної здатності, критичними параметрами є затримка та тремтіння, особливо для програм реального часу, таких як автономні транспортні засоби та дистанційні операції, де затримки можуть поставити під загрозу функціональність. Затримка вимірює

затримку передачі даних, а тремтіння фіксує мінливість цієї затримки. Мінімізація цих параметрів гарантує, що віртуальні комірки відповідають суворим вимогам послуг, чутливих до затримки. Таким чином, цілісна оцінка пропускної здатності, спектральної ефективності, затримки та джиттера забезпечує повне розуміння здатності віртуальної комірки підтримувати різноманітні випадки використання 5G.

Окрім пропускної здатності, надійність та покриття віртуальних комірок є життєво важливими для забезпечення стабільного та надійного обслуговування в різних середовищах. Співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR) – це фундаментальний показник, який інкапсулює якість бездротового з'єднання шляхом порівняння сили бажаного сигналу з перешкодами та фоновим шумом. Вищий SINR вказує на чистіше, надійніше з'єднання, що безпосередньо корелює з вищими швидкостями передачі даних та нижчим рівнем помилок. Наприклад, SINR вище 20 дБ зазвичай дозволяє використовувати схеми модуляції високого порядку, такі як 256-QAM, підвищуючи пропускну здатність. Ймовірність покриття, яка вимірює ймовірність того, що користувач відчує якість сигналу вище певного порогу, є ще одним ключовим показником. Вона відображає ступінь охоплення віртуальної комірки та залежить від таких факторів, як радіус комірки, коефіцієнт посилення антени та перешкоди навколишнього середовища. Ймовірність збою доповнює це, кількісно визначаючи ймовірність того, що якість сигналу падає нижче прийнятного рівня, що призводить до розриву з'єднань або погіршення обслуговування. Продуктивність на межі стільникової мережі — наскільки добре мережа підтримує якість на периферії покриття — є особливо важливою, оскільки користувачі на межах часто страждають від слабших сигналів та більших перешкод. Покращення продуктивності на межі стільникової мережі за допомогою таких методів, як формування променя та управління перешкодами, підвищує загальну надійність мережі, гарантуючи, що віртуальні стільники надають однакову якість обслуговування незалежно від місцезнаходження користувача [14].

Окрім продуктивності з точки зору швидкості та надійності, енергоефективність набула важливого значення в проектуванні та оцінці віртуальних стільникових мереж, зумовленої екологічними міркуваннями та зниженням експлуатаційних витрат. Споживання енергії на віртуальну стільникову мережу охоплює енергію, що використовується апаратним забезпеченням, програмними процесами та допоміжною інфраструктурою, такою як системи охолодження. Зниження споживання енергії без шкоди для продуктивності є важливим для сталого розгортання мережі, особливо враховуючи щільну кондицію інфраструктури 5G. Екологічні показники, такі як енергія на переданий біт, служать ефективними показниками впливу віртуальної стільникової мережі на навколишнє середовище, дозволяючи мережевим операторам оптимізувати конфігурації для мінімальних витрат енергії. Наприклад, адаптивні схеми модуляції та кодування можуть зменшити споживання енергії в періоди низького попиту, тоді як режими сну для компонентів базової станції можуть економити енергію під час простою. Досягнення балансу між високою продуктивністю та екологічною стійкістю вимагає ретельного врахування компромісів, таких як незначне зниження пропускної здатності для значно меншого споживання енергії. Отже, показники, що кількісно визначають енергоефективність, сприяють розвитку екологічно чистих віртуальних мереж, зберігаючи при цьому високі стандарти обслуговування, очікувані в екосистемах 5G.

Окрім статичних показників продуктивності, таких як ємність, надійність та енергоефективність, оцінка віртуальних комірок також повинна враховувати динамічні параметри, орієнтовані на користувача, які впливають на мобільність та загальний досвід користувача. Одним з найважливіших параметрів у цьому відношенні є коефіцієнт успішної передачі, який вимірює здатність мережі безперешкодно передавати поточні з'єднання між комірам без перерв або значних затримок. Високий коефіцієнт успішної передачі забезпечує безперебійне обслуговування, що особливо важливо для користувачів, які займаються високопродуктивноюмобільні дії, такі як поїздки на роботу автомобілем або

громадським транспортом, де поширені часті переходи між комірками. Доповнює це вимірювання затримки передачі, яке кількісно визначає час, необхідний для завершення цих переходів; нижчі значення затримки є важливими для підтримки безперервності обслуговування та роботи програм реального часу.

Таблиця 2.1 узагальнює ключові метрики, що застосовуються для оцінювання ефективності роботи віртуальних стільників у мережах 5G, відображаючи технічні параметри, які визначають якість радіоз'єднання, продуктивність доступу та стабільність роботи мережі. У ній представлені показники пропускної здатності, SINR, інтерференції, затримки, ефективності виділення ресурсних блоків, роботи beamforming, частоти хендоверів, балансування навантаження й рівня якості обслуговування, що дозволяє комплексно оцінити вплив віртуальних стільників на функціонування RAN.

Таблиця 2.1.

Метрик та їх вплив на віртуальні стільники

Метрика	Вплив
Пропускна здатність (Throughput)	Швидкість передавання даних у DL/UL для UE у межах віртуального стільника.
SINR	Співвідношення сигнал/інтерференція+шум, що визначає якість радіоканалу.
Інтерференція між стільниками	Рівень взаємних завад між фізичними стільниками до/після віртуалізації.
Latency	Кінцева затримка при передачі даних та її стабільність у динамічних умовах.
PRB Allocation Efficiency	Ефективність виділення ресурсних блоків для користувачів.
Beamforming Gain	Покращення сигналу завдяки адаптивному спрямуванню променя.

Кількість хендоверів	Частота переходів між стільниками (очікується зменшення для віртуальних).
Навантаження на RAN	Балансування навантаження між секторами та RU/DUs.
QoS / QoE	Якість обслуговування та сприйнята користувачем якість сервісу.

Крім того, пропускна здатність користувачів під час мобільності дає уявлення про здатність мережі підтримувати високі швидкості передачі даних, незважаючи на рух користувачів, підкреслюючи надійність динамічного управління ресурсами віртуальної комірки [15].

Метрики, що відображають якість обслуговування (QoS), такі як втрата пакетів, затримка та тремтіння, та якість досвіду (QoE), яка враховує суб'єктивну задоволеність користувачів, стають дедалі важливішими, оскільки вони враховують точку зору кінцевого користувача. Ці параметри разом впливають на те, наскільки добре мережа підтримує такі програми, як відеоконференції, онлайн-ігри та доповнена реальність, де стабільна та передбачувана продуктивність є важливою для задоволення користувачів.

Тому включення показників мобільності та досвіду користувачів до оцінки продуктивності гарантує, що віртуальні комірки оптимізовані не лише для статичних умов, але й для динамічних реалій поведінки користувачів та очікувань щодо обслуговування. Хоча вибір відповідних показників є вирішальним для комплексної оцінки продуктивності, виникає кілька проблем, пов'язаних з мінливістю сценаріїв розгортання та невід'ємними компромісами між різними параметрами. Віртуальні комірки розгортаються в різних середовищах — міських, приміських, сільських — кожне з яких має унікальні схеми перешкод, характеристики поширення та щільність користувачів, що ускладнює встановлення універсальних контрольних показників продуктивності. Наприклад, показник, який вказує на відмінне покриття в міських умовах, може бути менш актуальним у сільській місцевості з розрідженою інфраструктурою. Крім того,

оптимізація одного параметра часто тягне за собою компроміси в інших; підвищення надійності шляхом збільшення потужності або зменшення перешкод може призвести до більшого споживання енергії, тоді як пріоритет пропускної здатності може зменшити покриття або збільшити затримку. Ці компроміси вимагають нюансованого підходу до вибору показників, адаптованого до конкретних цілей розгортання та операційних контекстів. Більше того, відсутність стандартизованих контрольних показників продуктивності віртуальних комірок ускладнює порівняння між різними мережами та постачальниками, перешкоджаючи розвитку передового досвіду та регуляторної політики. Встановлення загальноприйнятих стандартів оцінки та методологій тестування є важливим для сприяння послідовній оцінці продуктивності, стимулювання інновацій та забезпечення того, щоб віртуальні комірки відповідали різноманітним вимогам екосистем 5G. Вирішення цих проблем вимагає спільних зусиль зацікавлених сторін галузі, регуляторів та дослідників для визначення чітких, адаптивних та комплексних рамок ефективності [16].

Ефективна оцінка віртуальних комірок у мережах 5G залежить від багатовимірного набору показників продуктивності, які охоплюють ємність, надійність, енергоефективність та взаємодію з користувачем. За допомогою таких показників, як пропускна здатність, спектральна ефективність, SINR, ймовірність покриття та енергія на біт, мережеві оператори можуть оцінити технічну надійність та стійкість віртуалізованої інфраструктури. Включення параметрів, пов'язаних з мобільністю та QoS, додатково гарантує, що ці віртуальні комірки можуть надавати безперебійне, високоякісне обслуговування в динамічних середовищах. Однак різноманітність сценаріїв розгортання та невід'ємні компроміси між різними параметрами продуктивності створюють значні труднощі для вибору та стандартизації показників. Встановлення консенсусу щодо стандартів еталонного рівня та адаптивних систем оцінки є життєво важливим для послідовної оцінки продуктивності та постійного вдосконалення. Зрештою, комплексний та стандартизований підхід до вимірювання продуктивності сприятиме розвитку стійких, ефективних та орієнтованих на користувача

віртуальних мереж 5G, здатних задовольнити зростаючі потреби сучасного бездротового зв'язку.

2.2. Методи моделювання радіомереж 5G та підходи до побудови експериментальних сценаріїв

Швидкий розвиток технологій бездротового зв'язку позиціонував мережі 5G як трансформаційну силу в численних галузях, обіцяючи безпрецедентні швидкості передачі даних, наднадійні з'єднання з низькою затримкою та масове підключення пристроїв. Щоб реалізувати ці можливості, дослідники та інженери використовують різні методи моделювання та експериментальні сценарні конструкції, які дозволяють детально аналізувати та оптимізувати продуктивність мережі перед її реальним розгортанням. У цьому есе досліджуються основні підходи до математичного та імітаційного моделювання, що використовуються в розробці мереж 5G, методи проектування репрезентативних експериментальних сценаріїв та роль передових програмних інструментів у сприянні цим процесам. Розуміючи ці методи, зацікавлені сторони можуть краще прогнозувати поведінку мережі, тестувати інновації та забезпечувати надійну, масштабовану інфраструктуру 5G [17].

Математичні та імітаційні моделі слугують основними інструментами в розробці та аналізі радіомереж 5G. Серед аналітичних підходів стохастична геометрія набула важливого значення завдяки своїй здатності статистично характеризувати просторовий розподіл мережевих елементів, таких як базові станції та користувачі. Наприклад, моделюючи базові станції як точки в процесі точок Пуассона, дослідники можуть отримати ймовірнісні показники покриття та перешкод, що забезпечує розуміння пропускної здатності та надійності мережі. Теорія черг також використовується для оцінки потоку мережевого трафіку, розподілу ресурсів та затримки, особливо в основних компонентах мережі. Що стосується моделювання, симуляції на системному рівні пропонують комплексне уявлення, моделюючи цілі мережі, включаючи поведінку протоколів, перешкоди та моделі мобільності, часто використовуючи такі інструменти, як MATLAB або спеціалізовані платформи, що моделюють великомасштабні середовища. З іншого боку, симуляції на рівні каналу зосереджуються на фізичному рівні, оцінюючи

поширення сигналу, схеми модуляції та характеристики антени з високою деталізацією. Ці моделі разом дозволяють тонко зрозуміти потенційну продуктивність мережі, але кожна має свої обмеження. Аналітичні моделі, хоча й обчислювально ефективні, часто спираються на спрощені припущення, які можуть не враховувати складні взаємодії, тоді як детальні симуляції вимагають значних обчислювальних ресурсів та часу. Балансування цих методів має вирішальне значення для точного представлення поведінки мережі в реальному світі та керівництва практичними стратегіями розгортання.

Таблиця 2.2 узагальнює основні методи моделювання радіомереж 5G, які застосовуються для оцінювання поведінки мережі в різних умовах.

Таблиця 2.2.

Методи моделювання радіомереж 5G

Метод	Характеристика
Аналітичні моделі	Стохастична геометрія, теорія черг, моделі покриття та інтерференції.
Моделі канального рівня	3GPP TR 38.901, CDL-A–E, моделі LOS/NLOS.
Ray-Tracing	Трасування променів з 3D-геометрією, моделювання відбиття й дифракції.
Моделі мобільності	Random Waypoint, Manhattan Grid, 3GPP Mobility Models.
Моделі розподілу користувачів	Рівномірний розподіл, hotspot, Poisson cluster.
Моделювання трафіку	Poisson, bursty-traffic, self-similar моделі для eMBB/URLLC/mMTC.

Вона охоплює аналітичні підходи, такі як стохастична геометрія та теорія черг, що дозволяють отримати статистичні оцінки покриття, інтерференції та затримок; моделі канального рівня, які забезпечують точне відтворення характеристик поширення сигналу відповідно до специфікацій 3GPP; методи Ray-Tracing для деталізованого аналізу багатопроменевості та впливу реального

середовища; моделі мобільності, що визначають поведінку користувачів у просторі; моделі розподілу користувачів, які відображають різні сценарії навантаження; а також методи моделювання трафіку, що дозволяють врахувати різні типи сервісів у мережі 5G. Сукупність цих методів формує основу для побудови коректних і репрезентативних модельних середовищ.

Побудова реалістичних експериментальних сценаріїв у тестуванні 5G передбачає ретельне визначення різних параметрів, які впливають на продуктивність мережі. Стратегії розподілу спектру повинні бути ретельно вибрані, щоб відображати поточну та майбутню регуляторну політику, таку як використання міліметрових хвильових діапазонів для розгортання високої пропускної здатності в містах. Моделі розподілу користувачів є важливими; наприклад, рівномірний розподіл може бути достатнім для сільських сценаріїв, тоді як моделі гарячих точок більше підходять для міського середовища з щільними кластерами користувачів. Моделі мобільності, включаючи швидкість пішоходів, рух транспортних засобів та динаміку передачі, суттєво впливають на стабільність мережі та якість обслуговування, що вимагає їх точного моделювання. Фактори навколишнього середовища також відіграють ключову роль: міське середовище призводить до багатопроменевого поширення та блокування сигналу через будівлі, тоді як сільські райони можуть мати менше перешкод, але довші відстані передачі. Врахування цих змінних гарантує, що сценарії відображатимуть реальні умови. Для стандартизації тестування та полегшення порівняльного аналізу, такі фреймворки, як визначені сценарії 3GPP, надають структуровані шаблони, які визначають такі параметри, як щільність користувачів, моделі трафіку та налаштування навколишнього середовища. Ці стандартизовані сценарії дозволяють проводити послідовний бенчмаркінг між різними дослідницькими групами та комерційними розгортаннями, сприяючи спільному прогресу в технології 5G.

Розгортання спеціалізованих програмних інструментів та платформ значно покращує моделювання та експериментальну налаштування мереж 5G. Популярні середовища моделювання, такі як NS-3, MATLAB та OMNeT++, пропонують

розширені бібліотеки та модулі, адаптовані для досліджень бездротового зв'язку, що дозволяє користувачам створювати налаштовані моделі, що відображають конкретні експериментальні умови. Наприклад, NS-3 підтримує детальне моделювання стека протоколів і може включати реальні моделі каналів, що робить його придатним для комплексної оцінки мережі. MATLAB надає універсальне середовище для розробки алгоритмів, обробки сигналів та аналізу на системному рівні, часто використовується разом з такими інструментами, як 5G Toolbox для формування променя, MIMO та моделювання каналів. OMNeT++ пропонує модульну архітектуру, яка дозволяє інтегрувати кілька мережевих компонентів та сценаріїв, що сприяє масштабним моделюванням. Окрім чистого програмного моделювання, інтеграція реальних даних, таких як моделі трафіку, вимірювання навколишнього середовища та показники продуктивності обладнання, може суттєво покращити точність моделі. Тестування апаратного забезпечення в циклі (HIL) додатково скорочує розрив між симуляцією та реальністю, дозволяючи реальним апаратним компонентам взаємодіяти з імітованими мережевими умовами, таким чином перевіряючи моделі в практичних умовах. Ці інструменти та методології разом дозволяють дослідникам проектувати, тестувати та оптимізувати мережі 5G з високою точністю та адаптивністю, прискорюючи перехід від теоретичних концепцій до розгортаних рішень.

Незважаючи на значний прогрес у методах моделювання для мереж 5G, залишається кілька проблем, які ускладнюють розробку точних та практичних моделей. Одна з основних проблем пов'язана з управлінням невід'ємною складністю, що виникає через різноманітні випадки використання — від покращеного мобільного широкосмугового зв'язку та масивного машинного зв'язку до наднадійного зв'язку з низькою затримкою — та безліччю мережевих архітектур, адаптованих до... ці програми. Ця різноманітність вимагає гнучких, багаторівневих моделей, здатних враховувати різноманітні моделі трафіку, вимоги до якості обслуговування та конфігурації обладнання. Крім того, оскільки масштаби мережі зростають і охоплюють щільні міські розгортання та великі сільські райони, забезпечення масштабованості та обчислювальної ефективності

стає все складнішим. Масштабні симуляції можуть бути ресурсоємними, часто вимагаючи високопродуктивних обчислювальних середовищ та оптимізованих алгоритмів для своєчасного отримання результатів. Крім того, усунення невизначеності та мінливості в поведінці користувачів, таких як непередбачувана мобільність, коливання дорожнього навантаження та динаміка навколишнього середовища, створює значний виклик. Ці фактори можуть призвести до розбіжностей між змодельованими прогнозами та реальною продуктивністю, що вимагає адаптивних моделей, які можуть враховувати та навчатися на основі поточних даних. Подолання цих перешкод має вирішальне значення для розробки надійних, надійних та масштабованих моделей мереж 5G, які можуть ефективно керувати рішеннями щодо розгортання та політики.

Таблиця 2.3.

Підходи до побудови експериментальних сценаріїв у 5G

Підхід	Характеристика
Стандартизовані сценарії 3GPP	UMa, UMi, InH, RMa з визначеними параметрами.
Параметри середовища	Забудова, блокування, 3D-карти, матеріали.
Експериментальні сценарії	Вибір спектра (FR1/FR2), щільності gNB, напрямків beamforming.
Інструменти моделювання	MATLAB 5G Toolbox, NS-3 mmWave, OMNeT++ Simu5G.
Інтеграція реальних даних	Радіокарти, виміряний трафік, параметри обладнання.
Hardware-in-the-loop	Тестування реальних RU/DU/CU у симульованих умовах.

Нові тенденції в моделюванні 5G формують майбутній ландшафт мережевого аналізу та побудови сценаріїв. Одним із помітних досягнень є інтеграція методів машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (ШІ), які сприяють прогнозному моделюванню, яке може адаптуватися до змінних

мережевих умов та поведінки користувачів. Ці інтелектуальні моделі можуть виявляти закономірності, оптимізувати розподіл ресурсів та прогнозувати показники продуктивності мережі з вищою точністю, ніж традиційні методи. Одночасно спостерігається рух до створення більш реалістичних, динамічних та адаптивних сценарних фреймворків, які точніше відображають реальне середовище. Такі фреймворки включають дані про навколишнє середовище в режимі реального часу, траєкторії мобільності користувачів та зміни трафіку, що дозволяє проводити більш комплексне тестування стійкості та продуктивності мережі в різних умовах. Крім того, прагнення до платформ моделювання з відкритим кодом та стандартизованих платформ сприяє тіснішій співпраці між дослідниками, учасниками галузі та політиками. Ці платформи дозволяють обмінюватися моделями, наборами даних та інструментами моделювання, зменшуючи дублювання зусиль та прискорюючи інновації. У міру розвитку цих тенденцій вони обіцяють підвищити точність, гнучкість та доступність моделювання мереж 5G, що зрештою сприятиме більш ефективним стратегіям розгортання та управління, які відповідають зростаючим вимогам сучасного зв'язку [18].

Розробка методів моделювання радіомереж 5G та побудови експериментальних сценаріїв – це багатогранне завдання, яке поєднує аналітичні та симуляційні підходи. Аналітичні моделі, такі як стохастична геометрія та теорія черг, забезпечують ефективне розуміння високого рівня, тоді як детальне симуляції – з використанням таких інструментів, як MATLAB, NS-3 та OMNeT++ – пропонують глибший, специфічний для сценарію аналіз. Побудова реалістичних експериментальних сценаріїв передбачає ретельний вибір параметрів, врахування екологічних факторів та дотримання стандартизованих фреймворків, таких як 3GPP, для забезпечення порівнянності. Незважаючи на ці досягнення, залишаються такі проблеми, як управління складністю, забезпечення масштабованості та врахування мінливості навколишнього середовища. У майбутньому інтеграція машинного навчання, створення більш адаптивних сценаріїв та впровадження платформ з відкритим кодом мають трансформувати

цю галузь, сприяючи тіснішій співпраці та точнішому моделюванню мереж. Разом ці методи та інновації лежать в основі подальшої еволюції технології 5G, дозволяючи створювати мережі, які є не тільки потужними та надійними, але й адаптованими до динамічного ландшафту сучасного бездротового зв'язку.

2.3. Алгоритми формування та керування віртуальними стільниками в мережах 5G і умови їх активації

Поява мереж 5G здійснила революцію в бездротовому зв'язку, забезпечивши безпрецедентний рівень швидкості, ємності та підключення. Наріжним каменем цього технологічного стрибка є концепція віртуальних комірок, які являють собою динамічно створювані та керовані сегменти мережі, що оптимізують використання ресурсів та покращують взаємодію з користувачем. На відміну від традиційних статичних структур комірок, віртуальні комірки використовують передові алгоритми та механізми координації для адаптації до коливань вимог мережі та мобільності користувачів. У цьому есе досліджуються структури, що лежать в основі формування віртуальних комірок, алгоритми, що беруть участь в ефективному управлінні їхніми ресурсами, та умови, необхідні для їх активації, тим самим забезпечуючи всебічне розуміння цього життєво важливого аспекту архітектури мережі 5G [19].

Таблиця 2.4 показує ключові алгоритми, що застосовуються для формування та керування віртуальними стільниками в мережах 5G, відображаючи їхні функціональні особливості та умови активації. У ній показано, як кластеризація користувачів, динамічне призначення логічного стільника, оптимізація радіоресурсів, адаптивний beamforming, балансування навантаження та централізоване керування на рівні CU забезпечують гнучке створення та перебудову зон покриття. Вказані умови активації демонструють, що ці механізми задіюються здебільшого в ситуаціях зростання інтерференції, перевантаження секторів, швидких змін трафіку або зниження параметрів QoS, що підкреслює

їхню роль у підтриманні стабільної та ефективної роботи RAN у динамічному середовищі 5G.

Таблиця 2.4.

Алгоритми формування та керування віртуальними стільниками в мережах 5G та умови їх активації

Алгоритм	Характеристика	Умови активації
Алгоритми кластеризації UE	Групування користувачів за просторовими та радіопараметрами для формування віртуального стільника.	Висока щільність UE, нерівномірний розподіл навантаження.
Динамічне призначення стільника	Призначення UE логічного віртуального стільника замість фізичного на основі RSRP/SINR.	Погіршення SINR, зростання інтерференції, перевантаження сектора.
Керування ресурсами (RRM)	Оптимізація виділення PRB, потужності та beamforming між логічними стільниками.	Дефіцит PRB, нерівномірний трафік, різкі зміни QoS.
Адаптивний beamforming	Спрямоване формування променів для створення ізольованих зон покриття.	Зміна напрямку UE, блокування сигналу, мультипасові ефекти.
Перерозподіл навантаження (Load Balancing)	Переміщення UE між віртуальними стільниками для оптимізації навантаження.	Перевищення порога завантаження, падіння швидкості обслуговування.
Централізоване керування CU	Логічне створення, об’єднання та розділення віртуальних стільників у CU.	Необхідність глобальної оптимізації та прогнозування навантаження.
Алгоритми прогнозування	Використання моделей ML для передбачення зміни навантаження та адаптації структури стільника.	Швидкі зміни трафіку, велика мобільність UE.
Інтерференційний контроль	Зменшення міжсекторних завад шляхом адаптації параметрів віртуального	Різке зниження SINR, поява міжстільникових перекриттів.

	покриття.	

Структури для формування віртуальних комірок у мережах 5G базуються на фундаментальних принципах, які підкреслюють гнучкість, масштабованість та адаптивність у реальному часі. Формування віртуальних комірок передбачає сегментацію мережі на логічні одиниці, які можна динамічно призначати користувачам на основі поточних умов, а не фіксованих географічних меж. Ключові алгоритми для цього процесу включають алгоритми кластеризації, які групують користувачів зі схожими умовами каналу або вимогами до обслуговування, та графові підходи, які оптимізують просторовий розподіл віртуальних комірок для мінімізації перешкод. Наприклад, у щільному міському середовищі такі алгоритми, як кластеризація K-середніх, можуть класифікувати користувачів на групи, які обслуговуються спільними віртуальними комірками, зменшуючи потребу в кількох фізичних базових станціях. Центральним у цьому процесі є координація між базовими станціями через централізовані або розподілені контролери, що забезпечує безперебійну передачу та спільне використання ресурсів. Користувацьке обладнання (UE) також відіграє життєво важливу роль, надаючи зворотний зв'язок у реальному часі щодо якості сигналу, моделей мобільності та вимог до обслуговування, що враховується алгоритмами для сприяння оптимальному створенню віртуальних комірок. Ця спільна структура гарантує, що віртуальні комірки не є статичними, а динамічно адаптуються до коливань мережі, тим самим максимізуючи ефективність та зручність використання. Керування ресурсами віртуальних комірок включає складні алгоритми, призначені для розподілу та оптимізації ємності мережі, мінімізуючи перешкоди та перевантаження. Стратегії розподілу ресурсів у віртуальних комірок включають динамічне розподілення спектру, де смуга пропускання розподіляється на основі попиту в режимі реального часу, та алгоритми керування потужністю, які регулюють потужність передачі для покращення якості сигналу та зменшення перешкод. Наприклад, такі алгоритми, як пропорційна справедливість, забезпечують справедливий розподіл ресурсів між

користувачами з різними вимогами до даних, запобігаючи сценаріям, коли певні користувачі монополізують смугу пропускання. Алгоритми балансування навантаження ще більше підвищують продуктивність, інтелектуально розподіляючи трафік між кількома віртуальними комірок, особливо в години пік або в сценаріях високого попиту, таких як під час великих публічних заходів або в міських гарячих точках. Методи зменшення перешкод мають вирішальне значення, особливо коли перекриття віртуальних комірок призводить до перешкод у спільних каналах. Для вирішення цих проблем використовуються такі методи, як координація перешкод, формування променя та заглушення перешкод. Наприклад, координована багатоточкова передача (CoMP) дозволяє кільком базовим станціям синхронізувати свої передачі, тим самим зменшуючи перешкоди та покращуючи загальну пропускну здатність мережі. Ці алгоритми працюють злагоджено, щоб забезпечити ефективну роботу віртуальних комірок, забезпечуючи стабільну якість обслуговування навіть у складних мережевих середовищах.

Активація віртуальних комірок залежить від кількох критичних умов, які забезпечують їх ефективне розгортання та експлуатацію. Порогові значення якості сигналу, такі як мінімальна сила прийнятого сигналу та низький рівень помилок, є основними визначальними факторами; віртуальні комірки активуються лише тоді, коли пристрій користувача вказує, що існуюче з'єднання не може відповідати необхідним стандартам якості. Міркування мобільності користувачів також впливають на активацію, оскільки високомобільні користувачі можуть потребувати інших стратегій управління порівняно зі стаціонарними або повільно рухомими користувачами; наприклад, високошвидкісні поїзди або транспортні засоби можуть ініціювати активацію виділених віртуальних комірок, призначених для підтримки безперебійного з'єднання. Попит на мережевий трафік та його пропускна здатність є додатковими факторами — віртуальні комірки активуються у відповідь на збільшення потоку даних, особливо під час подій або пікових періодів, щоб запобігти перевантаженню мережі. Фактори навколишнього середовища, такі як фізичні перешкоди, такі як будівлі або природний рельєф, можуть погіршити якість сигналу та вимагати активації додаткових віртуальних

комірок для підтримки покриття. Перешкоди від зовнішніх джерел, таких як сусідні мережі або електронні пристрої, також можуть впливати на умови активації. Наприклад, у районах з високим рівнем перешкод активація віртуальної комірки зі сфокусованим формуванням променя може покращити цілісність сигналу. У сукупності ці умови гарантують, що віртуальні комірки активуються лише за необхідності, оптимізуючи використання ресурсів та підтримуючи високоякісну зв'язок у різних операційних сценаріях. Впровадження алгоритмів керування віртуальними комірками в мережах 5G створює кілька суттєвих проблем, які необхідно вирішити для повної реалізації їхнього потенціалу. Однією з основних проблем є обчислювальна складність, пов'язана з обробкою величезних обсягів даних у режимі реального часу для динамічного формування та налаштування віртуальних комірок. Ці алгоритми вимагають можливості швидкого прийняття рішень для реагування на коливання мережевих умов, мобільність користувачів та фактори навколишнього середовища, що може навантажувати обчислювальні ресурси та уповільнювати час відгуку. Забезпечення мінімальної затримки під час перемикання віртуальних комірок має вирішальне значення для підтримки безперебійної взаємодії з користувачами. особливо під час передачі, коли користувачі переміщуються між різними віртуальними комірками; будь-які затримки можуть призвести до розриву з'єднань або погіршення якості обслуговування. Крім того, інтеграція цих передових алгоритмів з існуючою мережевою інфраструктурою та стандартами створює проблеми сумісності. Багато сучасних мережевих компонентів спочатку були розроблені для статичних конфігурацій комірок, тому для підтримки динамічного управління віртуальними комірками необхідні модифікації або оновлення. Проблеми сумісності можуть перешкоджати широкому розгортанню та вимагати масштабних зусиль щодо тестування та стандартизації. Вирішення цих проблем включає розробку ефективних алгоритмів, які балансують точність з обчислювальною можливістю, проектування надійних механізмів передачі для мінімізації затримки та забезпечення сумісності зі застарілими системами за допомогою стандартизованих протоколів. Подолання цих перешкод є важливим

для практичного та масштабованого впровадження технологій віртуальних комірок у мережах 5G.

Оцінка ефективності алгоритмів, що використовуються для формування та управління віртуальними комірками, спирається на комплексні показники продуктивності та методи валідації. Ключові показники включають пропускну здатність, яка вимірює швидкість передачі даних та вказує на пропускну здатність мережі; затримку, що відображає затримку часу, що виникає під час передачі даних; та надійність покриття, що позначає узгодженість обслуговування в різних географічних районах та сценаріях користувача. Ці показники надають кількісне уявлення про те, наскільки добре алгоритми оптимізують продуктивність мережі та користувацький досвід. Для перевірки цих алгоритмів дослідники використовують різні середовища моделювання та тестування, які відтворюють реальні мережеві умови. Такі середовища дозволяють проводити контрольовані експерименти, тестувати різні сценарії та оцінювати стійкість алгоритмів перед розгортанням. Тематичні дослідження додатково демонструють практичні успіхи, ілюструючи випадки, коли алгоритми формування та управління віртуальними комірками призвели до значних покращень. Наприклад, моделювання показало збільшення швидкості передачі даних та зменшення затримки під час масштабних подій, тоді як реальне розгортання в міських районах призвело до покращення покриття та задоволеності користувачів. Ці оцінки є життєво важливими для вдосконалення алгоритмів, забезпечення їх відповідності експлуатаційним вимогам та сприяння їх впровадженню в комерційних мережах 5G [20].

Формування та управління віртуальними комірками в мережах 5G здійснюється за допомогою складних фреймворків та алгоритмів, розроблених для оптимізації використання ресурсів, покращення зв'язку та адаптації до динамічних умов мережі. Формування віртуальних комірок спирається на кластеризацію, координацію між базовими станціями та активний зворотний зв'язок від користувацького обладнання для створення гнучких, масштабованих сегментів мережі. Ефективне управління ресурсами в цих комірках включає такі передові стратегії, як динамічний розподіл спектру, балансування навантаження та

зменшення перешкод, що є важливим для підтримки високоякісного обслуговування в складних середовищах. Однак реалізація цих алгоритмів стикається з проблемами, пов'язаними з обчислювальними вимогами, безперебійною передачею зв'язку та сумісністю з існуючою інфраструктурою. Для забезпечення їхнього успіху вирішальне значення має ретельна оцінка продуктивності за допомогою таких показників, як пропускна здатність та затримка, а також моделювання та реальні тематичні дослідження. З розвитком технологій подолання цих проблем прокладе шлях для більш стійких, ефективних та орієнтованих на користувача мереж 5G, закріплюючи віртуальні комірки як фундаментальний компонент майбутніх систем бездротового зв'язку.

2.4. Опис програмних засобів моделювання, вибір інструментів аналізу та послідовність проведення експериментів

У сфері наукових досліджень та інженерного проектування використання програмного забезпечення для моделювання стало незамінним для моделювання складних систем, аналізу даних та прогнозування результатів. Ці цифрові інструменти слугують віртуальними лабораторіями, що дозволяють практикам створювати детальні представлення фізичних явищ, тим самим зменшуючи потребу в дорогих та трудомістких експериментах. Вибір відповідного програмного забезпечення для моделювання в поєднанні з вибором відповідних інструментів аналізу є критичним кроком, який впливає на точність, ефективність та загальний успіх проекту. У цьому есе досліджуються основні характеристики програмного забезпечення для моделювання, критерії вибору інструментів аналізу та систематичний процес вибору найбільш підходящих інструментів для конкретних експериментальних послідовностей [21].

Програмне забезпечення для моделювання функціонує як обчислювальна платформа, призначена для побудови, моделювання та аналізу моделей реальних систем у різних наукових та інженерних дисциплінах. Наприклад, у цивільному будівництві програмне забезпечення, таке як AutoCAD та Revit, сприяє

детальному архітектурному та структурному проектуванню, тоді як у хімічній інженерії такі інструменти, як Aspen Plus, дозволяють моделювати та оптимізувати процеси. У фізиці програмне забезпечення, таке як COMSOL Multiphysics, дозволяє проводити мультифізичне моделювання, інтегруючи теплові, електричні та механічні явища. Основна мета цих програм полягає в перетворенні теоретичних концепцій у візуальні, числові та графічні формати, якими можна маніпулювати та досліджувати. Під час вибору програмного забезпечення для моделювання першочергове значення мають такі ключові характеристики, як сумісність з існуючими системами, масштабованість, складність інтерфейсу користувача та підтримка налаштування. Наприклад, вчений-еколог може надати пріоритет програмному забезпеченню, яке інтегрує дані ГІС, тоді як інженер з аерокосмічної галузі може шукати можливості високоточного моделювання. Додаткові міркування включають наявність технічної підтримки, ресурси спільноти та вартість ліцензування, які впливають на придатність програмного забезпечення для довгострокового використання та потреби проекту.



Рис. 2.2. Схема інтеграції засобів моделювання та інструментів аналізу в експериментальному процесі

Вибір інструментів аналізу, сумісних із програмним забезпеченням для моделювання, залежить від кількох критичних критеріїв, оскільки кожен інструмент розширює аналітичні можливості основної платформи. Сумісність забезпечує безперебійну інтеграцію, запобігаючи технічним проблемам, які можуть поставити під загрозу цілісність даних або ефективність робочого процесу. Наприклад, пакети статистичного аналізу, такі як R або SPSS, часто інтегруються із середовищами моделювання, такими як MATLAB або Python, що спрощує аналіз складних даних. Спектр аналітичних можливостей не менш важливий; деякі проекти вимагають простих графічних виводів, тоді як інші вимагають розширеного числового моделювання, аналізу чутливості або статистичного висновку. Наприклад, у біомедичних дослідженнях інструменти графічної візуалізації даних допомагають інтерпретувати експериментальні результати, тоді як у будівельній інженерії інструменти аналізу кінцевих елементів оцінюють розподіл напружень. Простота використання та інтуїтивно зрозумілі інтерфейси користувача також важливі, особливо коли задіяні міждисциплінарні команди з різним технічним досвідом. Зручні інструменти скорочують час навчання, мінімізують помилки та пришвидшують терміни виконання проекту. Зрештою, вибір залежить від балансування цих можливостей зі складністю проекту, доступними ресурсами та досвідом членів команди.

Процес вибору найбільш підходящих інструментів аналізу включає систематичну оцінку вимог та цілей, специфічних для проекту. Спочатку дослідники повинні чітко визначити обсяг своїх експериментів — чи мають вони на меті виконувати динамічне моделювання, статистичний аналіз чи графічні представлення — та визначити ключові результати, яких вони прагнуть досягти. Наприклад, проект моделювання клімату може пріоритезувати інструменти, здатні обробляти великі набори даних та складний часовий аналіз, тоді як проект оптимізації виробництва може зосередитися на моделюванні процесів та аналізі

витрат. Після визначення цілей, огляд функціональності та обмежень потенційних інструментів стає важливим; це включає оцінку їхньої обчислювальної потужності, можливостей обробки даних та сумісності з існуючою програмною інфраструктурою. Консультації з рекомендаціями експертів, такими як рецензовані тематичні дослідження або професійні мережі, можуть надати цінну інформацію про практичну ефективність цих інструментів. Наприклад, тематичні дослідження, що демонструють успішне застосування конкретного програмного забезпечення в подібних проектах, можуть допомогти у прийнятті рішень, висвітлюючи сильні сторони та потенційні недоліки. Ретельно оцінюючи ці фактори, дослідники можуть переконатися, що обрані ними інструменти аналізу ефективно підтримують їхню експериментальну послідовність та сприяють надійним, достовірним результатам.

Розробка ефективної послідовності експериментів є життєво важливим компонентом використання інструментів моделювання та аналізу для досягнення значущих результатів. Процес починається з чіткого визначення експериментальних цілей та гіпотез, які служать дороговказом для подальшої діяльності. Наприклад, дослідник, який досліджує міцність матеріалу, може сформулювати гіпотези про межі напруження за різних умов, керуючи вибором моделювань та випробувань. Після визначення цілей, планування порядку експериментів стає важливим для максимізації ефективності використання ресурсів та наукової результативності. Пріоритетність експериментів, що надають фундаментальні дані або критично важливу інформацію, може запобігти надмірному тестуванню та оптимізувати робочий процес. Включення етапів калібрування гарантує, що моделі точно відображають реальні умови, тоді як валідаційні експерименти перевіряють їхні прогностичні можливості. Аналіз чутливості відіграє вирішальну роль, визначаючи, які параметри найбільше впливають на результати, що дозволяє цілеспрямовано коригувати та зменшувати невизначеності. Ітеративний підхід, де початкові результати впливають на уточнення, підвищує надійність дослідницького процесу. Отже, продумане проектування послідовності сприяє систематичному переходу від формулювання

гіпотез до перевірених висновків, оптимізуючи як використання ресурсів, так і наукову точність.

Інтеграція програмного забезпечення для моделювання, інструментів аналізу та експериментального робочого процесу є основоположною для досягнення цілісних та ефективних дослідницьких процесів. Безперебійний потік даних між різними компонентами гарантує, що результати моделювання можна легко проаналізувати, а висновки аналізу можуть бути корисними для подальших зусиль моделювання. Наприклад, автоматизована передача даних з результатів моделювання на платформи статистичного аналізу мінімізує помилки ручного виконання та прискорює цикл тестування та уточнення. Ця інтеграція підтримує ітеративну методологію, де початкові результати призводять до коригування моделі, переоцінки гіпотез та подальших експериментів. Наприклад, попередні результати можуть вказувати на необхідність уточнення вхідних параметрів або розширення обсягу моделювання. Цикли зворотного зв'язку дозволяють дослідникам постійно вдосконалювати моделі та експериментальні плани, підвищуючи точність та релевантність. Підтримка сумісності між програмними платформами та встановлення чітких протоколів для управління даними є важливими для запобігання вузьким місцям. Загалом, гармонійна інтеграція інструментів та робочих процесів сприяє динамічному дослідницькому середовищу, здатному адаптуватися до нових знань, що зрештою призводить до більш надійних та ефективних результатів.

Ефективне використання програмного забезпечення для моделювання, ретельний вибір інструментів аналізу та стратегічне планування експериментальних послідовностей разом лежать в основі успішних наукових та інженерних досліджень. Програмне забезпечення для моделювання функціонує як універсальна платформа для побудови, моделювання та аналізу складних систем, з ключовими характеристиками, що впливають на його придатність для конкретних проектів. Вибір сумісних інструментів аналізу включає оцінку їхньої функціональності, простоти використання та можливостей інтеграції для забезпечення комплексного аналізу даних. Процес проектування послідовності

експериментів підкреслює чіткість цілей, оптимізацію ресурсів та ітеративну валідацію, що підвищує надійність результатів. Нарешті, інтеграція програмного забезпечення та інструментів у злагоджений робочий процес, що сприяє безперебійному потоку даних та ітеративному уточненню, максимізує ефективність та якість отриманих знань. Разом ці елементи утворюють систематичний підхід, який дозволяє дослідникам проводити ретельні, ресурсоефективні експерименти, зрештою розвиваючи знання та технологічні інновації.

2.5. Опис підходу до моделювання та послідовність проведення експериментів

У прагненні зрозуміти складні системи, розробка надійного та надійного підходу до моделювання є надзвичайно важливою. У цьому есе окреслено методологію, що використовується для побудови комплексної моделі, зосереджуючись на теоретичній базі, детальних компонентах та математичних формулюваннях, що лежать в основі аналізу. Систематично викладаючи кожен аспект, метою є надання чіткого та детального опису послідовності експериментів, розроблених для перевірки та вдосконалення моделі, забезпечуючи її застосовність у різних сценаріях. Обраний підхід до моделювання зумовлений необхідністю точного відображення динамічних взаємодій у системі, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень та прогнозному аналізу у відповідній галузі дослідження.

Підхід до моделювання, прийнятий у цьому дослідженні, ґрунтується на добре усталеній теоретичній базі, зокрема, з використанням перспективи системної динаміки. Ця база дозволяє представляти складні взаємодії та петлі зворотного зв'язку між змінними, що робить її особливо придатною для фіксації нелінійної поведінки, яка часто спостерігається в реальних системах. Вибір цього підходу обґрунтований його доведеною ефективністю в попередніх дослідницьких проектах, де аналізувалися подібні динамічні явища, такі як моделювання

екологічних систем та економічне прогнозування. Ключові припущення, що лежать в основі моделі, включають сталість певних параметрів протягом періоду моделювання, лінійність конкретних взаємодій для спрощення та нехтування стохастичними збуреннями на початкових фазах, щоб зосередитися на детермінованій поведінці. Ці припущення оптимізують процес моделювання, зберігаючи при цьому достатню точність до реальної системи, тим самим забезпечуючи чіткішу інтерпретацію результатів та полегшуючи подальше уточнення.

Модель містить кілька первинних змінних та параметрів, які представляють основні елементи досліджуваної системи. До них належать змінні стану, такі як рівень популяції, запаси ресурсів та умови навколишнього середовища, а також такі параметри, як темпи зростання, коефіцієнти взаємодії та константи розпаду. Механізми взаємодії між цими компонентами моделюються за допомогою визначених співвідношень, таких як диференціальні рівняння або алгебраїчні функції, які описують, як зміни однієї змінної впливають на інші з часом. Наприклад, збільшення доступності ресурсів може призвести до зростання населення, що, у свою чергу, впливає на темпи виснаження ресурсів. Крім того, модель враховує зовнішні фактори, такі як сезонні коливання, політичні втручання або зовнішні шоки, представлені як граничні умови або вхідні функції. Ці зовнішні впливи мають вирішальне значення для моделювання реалістичних сценаріїв та перевірки стійкості системи до різних стресових факторів. Зафіксувавши ці компоненти та взаємодії, модель забезпечує комплексну основу для аналізу поведінки системи та реакції на різні подразники [22].

В основі підходу до моделювання лежить набір математичних рівнянь, які формалізують взаємозв'язки між змінними та параметрами. Ці рівняння виводяться на основі основних теорій та емпіричних даних, часто включаючи диференціальні та алгебраїчні рівняння, що описують часові зміни та стаціонарні умови. Використані обчислювальні методи включають методи числового інтегрування, такі як методи Рунге-Кутти, які сприяють розв'язанню складних систем рівнянь з високою точністю. Для забезпечення надійності та валідності

моделі впроваджуються суворі процедури валідації, включаючи аналіз чутливості для оцінки впливу параметрів, порівняння з експериментальними або польовими даними та перевірку узгодженості математичної стабільності рішень. Ці кроки валідації є важливими для встановлення впевненості в прогностичних можливостях моделі та для визначення областей, що потребують подальшого вдосконалення. Завдяки ретельному формулюванню та валідації математична модель служить потужним інструментом для моделювання системної динаміки та керівництва експериментальним дизайном, як показано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Етапи моделювання та послідовність проведення експериментів

Етап процесу	Основні характеристики та методи	Мета етапу
Теоретична база	Перспектива системної динаміки, врахування нелінійної поведінки та петель зворотного зв'язку.	Формування надійної основи для представлення складних взаємодій у системі.
Математичне формулювання	Диференціальні та алгебраїчні рівняння; методи числового інтегрування (Рунге-Кутти).	Формалізація взаємозв'язків між змінними та параметрами для обчислювального аналізу.
Калібрування та валідація	Ітеративне коригування параметрів (метод найменших квадратів, генетичні алгоритми), аналіз чутливості.	Мінімізація розбіжностей між моделлю та реальністю; встановлення довіри до прогнозів.
Послідовність експериментів	Від базового моделювання за стандартних умов до поступового введення зовнішніх факторів та шоків.	Ізоляція впливу конкретних змінних та ітеративне вдосконалення моделі.
Збір та аналіз даних	Вимірювання змінних стану; регресійний аналіз, аналіз часових рядів, оцінка метрик MSE та R2.	Перевірка прогностичної точності та кількісна оцінка ефективності моделі.
Модифікація та розвиток	Включення стохастичних елементів, адаптивних механізмів та методів машинного навчання.	Подолання обмежень детермінованої структури та підвищення релевантності моделі.

Фундаментальний аспект побудови точної та надійної моделі включає інтеграцію емпіричних даних для оцінки та уточнення параметрів системи. Основні джерела даних включають польові вимірювання, експериментальні спостереження, історичні записи та відповідні опубліковані дослідження. Ці набори даних забезпечують кількісну основу, необхідну для призначення реалістичних значень параметрам моделі, таким як темпи зростання, коефіцієнти взаємодії та константи спаду. Після збору дані проходять процес калібрування, під час якого параметри моделі ітеративно коригуються, щоб мінімізувати розбіжності між змодельованими вихідними даними та спостережуваними даними. Цей процес часто використовує алгоритми оптимізації, такі як метод найменших квадратів або генетичні алгоритми, для визначення наборів параметрів, які найкраще відтворюють поведінку в реальному світі. Крім того, аналіз чутливості відіграє життєво важливу роль на цьому етапі, систематично змінюючи ключові параметри в межах правдоподібних діапазонів для оцінки їхнього впливу на результати моделі. Цей крок допомагає визначити, які параметри найбільше впливають на динаміку системи, спрямовуючи подальші зусилля зі збору даних та виділяючи області, де оцінки параметрів потребують більшої точності. Завдяки ретельному калібруванню та аналізу чутливості модель досягає вищого ступеня точності та надійності, гарантуючи, що наступні симуляції відображають реалістичні реакції системи.

Планування експериментів керується певними критеріями, спрямованими на ретельне тестування прогностичних можливостей моделі та розуміння поведінки системи за різних умов. Експериментальні сценарії вибираються на основі їхньої актуальності для реальних застосувань. потенціал для оскарження припущень моделі та здатність виявляти реакції системи на різні стимули. Умови контролю встановлюються як базові, підтримуючи постійні зовнішні фактори, такі як початкові рівні популяції, доступність ресурсів або умови навколишнього середовища. Змінні умови систематично маніпулюють, наприклад, введення зовнішніх шоків, зміна вхідних ресурсів або зміна параметрів політики, щоб спостерігати їхній вплив на систему. Щоб забезпечити надійність та статистичну

значущість результатів, експерименти включають стратегії реплікації, де кожен сценарій повторюється кілька разів з невеликими варіаціями, щоб врахувати стохастичні коливання та невизначеності вимірювань. Цей підхід підвищує стійкість результатів, дозволяючи більш впевнено інтерпретувати реакції системи та гарантуючи, що спостережувані ефекти пояснюються маніпульованими змінними, а не випадковими варіаціями.

Послідовність експериментів ретельно структурована для сприяння поступовому розумінню та ітеративному вдосконаленню моделі. Початкова фаза включає базове моделювання за стандартних умов, що служить орієнтиром для наступних тестів. Після цього експерименти розробляються для поступового введення зовнішніх факторів, таких як зміни навколишнього середовища або політичні втручання, для оцінки їхнього впливу на систему. Кожна фаза базується на попередніх результатах, що дозволяє поступово оцінювати точність моделі та її прогностичну здатність. Обґрунтування такого порядку полягає в тому, щоб спочатку встановити стабільну та калібровану базову лінію, перш ніж досліджувати складніші сценарії, що допомагає ізолювати вплив конкретних змінних. У міру проведення експериментів вносяться корективи на основі спостережуваних розбіжностей або неочікуваної поведінки, використовуючи ітеративний підхід тестування. Це включає уточнення оцінок параметрів, зміну граничних умов або включення додаткових механізмів у модель для підвищення її точності. Такий адаптивний процес гарантує, що підхід до моделювання залишається узгодженим з емпіричними спостереженнями та підвищує його корисність для аналізу сценаріїв та підтримки рішень.

Ефективний збір даних та ретельний аналіз є важливими для перевірки прогностичних можливостей моделі та забезпечення її надійності. Експериментальні результати систематично реєструються за допомогою точних інструментів вимірювання та систем збору даних, які регулярно фіксують такі змінні, як показники чисельності населення, рівні ресурсів та умови навколишнього середовища. Для полегшення комплексної інтерпретації зібрані дані проходять статистичний аналіз за допомогою різних інструментів,

включаючи описову статистику для узагальнення тенденцій, регресійний аналіз для виявлення зв'язків між змінними та перевірку гіпотез для визначення значущості спостережуваних ефектів. Для виявлення складних закономірностей та взаємодій у даних використовуються передові методи, такі як аналіз часових рядів та багатовимірний аналіз. Критерії оцінки ефективності моделі охоплюють такі показники, як середньоквадратична помилка (MSE), коефіцієнт детермінації (R^2) та аналіз залишків, які разом оцінюють точність та узгодженість результатів моделювання порівняно з емпіричними спостереженнями. Ці стандарти оцінки дозволяють дослідникам кількісно оцінити прогностичну точність моделі, виявити розбіжності та спрямувати подальше вдосконалення. Завдяки ретельному збору даних та ретельній статистичній інтерпретації, надійність моделі підсилюється, гарантуючи, що її прогнози добре обґрунтовані на реальних даних та здатні інформувати про практичне прийняття рішень.

Незважаючи на комплексний характер поточного підходу до моделювання, слід враховувати кілька обмежень. Одним з потенційних обмежень є залежність від припущення про сталість параметрів з часом, що може надмірно спрощувати динамічні системи, де параметри коливаються через зовнішні впливи або внутрішні зворотні зв'язки. Крім того, детермінована структура моделі може не повністю враховувати стохастичні варіації, властиві багатьом реальним системам, що потенційно обмежує її прогностичну точність за невизначених умов. Для усунення цих обмежень запропоновані модифікації включають включення стохастичних елементів, таких як ймовірнісні розподіли для ключових параметрів, та впровадження адаптивних механізмів, які дозволяють параметрам розвиватися на основі зворотних зв'язків системи. Крім того, розширення експериментального обсягу для включення додаткових змінних, таких як соціально-економічні фактори або мінливість клімату, може підвищити повноту та застосовність моделі. Майбутні плани досліджень включають інтеграцію методів машинного навчання для покращення оцінки параметрів, проведення довгострокових польових досліджень для отримання більш масштабних вхідних даних та вивчення підходів до багатомасштабного моделювання для поєднання локальної та глобальної

динаміки. Ці досягнення спрямовані на підвищення точності, надійності та релевантності моделі. зрештою сприяючи розробці ефективніших стратегій для управління системою та формулювання політики.

Підсумовуючи, у цьому есе викладено детальний та систематичний підхід до моделювання складних систем, починаючи з фундаментальної теоретичної бази, що ґрунтується на системній динаміці. Далі описано основні компоненти моделі, включаючи ключові змінні, взаємодії та зовнішні фактори, а потім математичне формулювання з використанням основних рівнянь та обчислювальних методів, перевірених за допомогою суворих процедур. Було підкреслено важливість емпіричних даних та процесів калібрування для забезпечення реалістичного та надійного моделювання. Дизайн та послідовність експериментів були ретельно розроблені для перевірки прогностичної здатності моделі за різних сценаріїв, а збір даних та статистичний аналіз слугували життєво важливими інструментами для оцінки ефективності. Нарешті, в обговоренні було визнано поточні обмеження та запропоновано майбутні вдосконалення для підвищення точності та розширення сфери застосування моделі. Разом ці компоненти утворюють комплексну методологію, яка не лише сприяє розумінню даної системи, але й забезпечує міцну основу для постійного вдосконалення та застосування. Зрештою, добре побудований підхід до моделювання в поєднанні з ітеративними експериментами та постійним вдосконаленням має значні перспективи для інформування прийняття рішень та сприяння сталому управлінню складними системами [23].

3. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІРТУАЛЬНИХ СТІЛЬНИКІВ У МЕРЕЖАХ П’ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

3.1. Вплив віртуальних стільників на пропускну здатність, завантаження мережі та якість радіоканалу

Поява віртуальних комірок являє собою значний технологічний прогрес у мережах бездротового зв'язку, обіцяючи революціонізувати розподіл та управління мережевими ресурсами. На відміну від традиційних архітектур фіксованих комірок, віртуальні комірки динамічно адаптуються до змінних вимог мережі та умов навколишнього середовища, що призводить до покращення ефективності використання спектру, розподілу навантаження та якості сигналу. Досліджується багатогранний вплив віртуальних комірок на використання пропускної здатності, балансування навантаження мережі та якість радіоканалів, підкреслюючи як їхні переваги, так і проблеми, які вони створюють. Детально розглянувши ці аспекти, ми можемо краще зрозуміти, як віртуальні комірки формують майбутнє систем бездротового зв'язку [24].

Одна з основних переваг віртуальних комірок полягає в їхній здатності підвищувати ефективність використання спектру завдяки динамічному розподілу пропускної здатності. Традиційні стільникові мережі часто виділяють фіксовані сегменти пропускної здатності певним комірам, що може призвести до недовикористання в години поза піком та перевантаження в години пік. Віртуальні комірки вирішують цю неефективність, перерозподіляючи ресурси спектру в режимі реального часу на основі попиту користувачів та моделей трафіку. Наприклад, у періоди високого трафіку в міських районах віртуальні комірки можуть концентрувати пропускну здатність там, де вона найбільше потрібна, забезпечуючи плавніший користувацький досвід та вищу пропускну здатність даних. І навпаки, в години поза піком надлишкову пропускну здатність можна перерозподілити на інші частини мережі. Незважаючи на ці переваги, управління такою гнучкою системою створює складнощі, включаючи управління

перешкодами та забезпечення справедливого розподілу пропускної здатності між користувачами. Перешкоди можуть виникати, коли віртуальні комірки перекриваються або коли кілька віртуальних комірок конкурують за один і той самий спектр, що потенційно погіршує якість обслуговування. Тому необхідні складні алгоритми для ефективного моніторингу та координації розподілу пропускної здатності, балансуючи ефективність зі справедливістю, щоб запобігти невигідному становищу будь-якого користувача чи програми [25].

Для візуалізації переваг динамічного керування ресурсами на рис. 3.1 представлено порівняльні криві завантаження спектра протягом добового циклу. Графік наочно демонструє, що традиційна архітектура з фіксованою смугою пропускання призводить до значного недовикористання ресурсів у періоди низького трафіку та до виникнення заторів у години пік. Натомість віртуалізована модель дозволяє еластично масштабувати доступну ємність відповідно до реального попиту, що забезпечує стабільно високу спектральну ефективність та запобігає деградації сервісів при раптових сплесках активності користувачів.

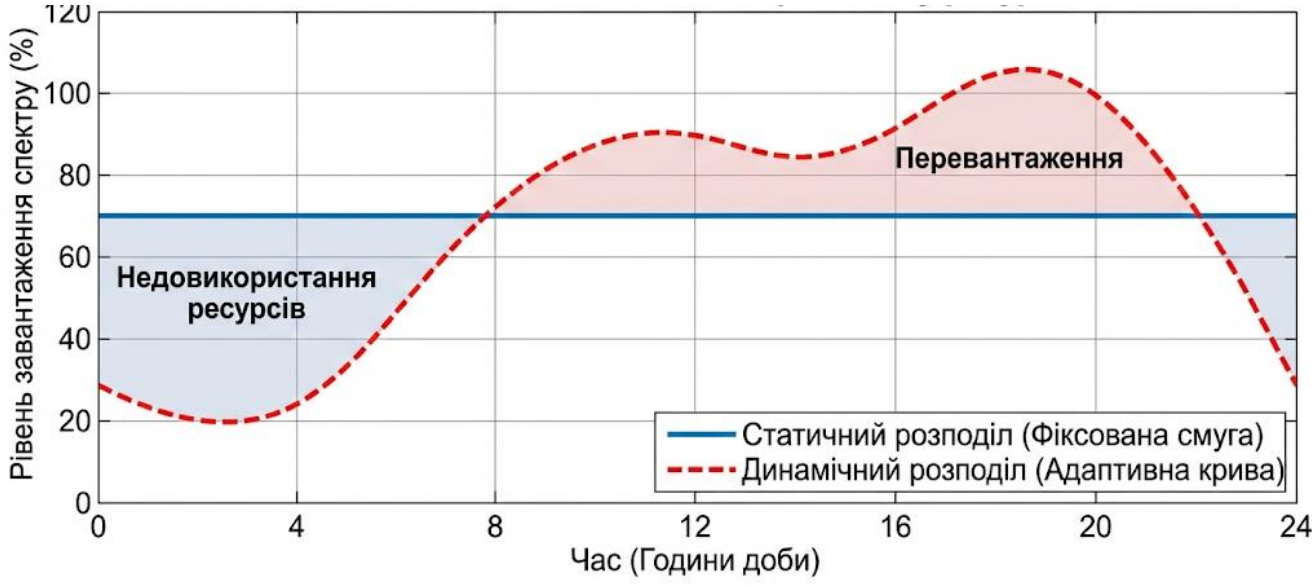


Рис. 3.1. Порівняльний аналіз ефективності використання спектра при статичному та динамічному (віртуалізованому) розподілі ресурсів

Віртуальні комірки також відіграють вирішальну роль у більш рівномірному розподілі мережевого навантаження по всій інфраструктурі, тим самим

зменшуючи перевантаження та підвищуючи загальну продуктивність мережі. Використовуючи дані в режимі реального часу та передові алгоритми, віртуальні комірки можуть динамічно перерозподіляти ресурси в області з підвищеним попитом. Наприклад, під час великих подій, таких як концерти чи спортивні матчі, віртуальні комірки можуть виявляти локалізовані сплески трафіку та реагувати, перенаправляючи пропускну здатність та обчислювальну потужність, щоб врахувати збільшене навантаження. Така адаптивна поведінка мінімізує вузькі місця та забезпечує стабільну якість обслуговування для користувачів. Однак досягнення такого безперебійного балансування навантаження вимагає складних обчислювальних процесів, включаючи постійний моніторинг стану мережі та алгоритми прийняття рішень у режимі реального часу. Ці процеси збільшують накладні витрати на обробку та вимагають значних обчислювальних ресурсів, що може призвести до затримки або вимагати більш потужної інфраструктури. Отже, оператори мереж повинні зважувати переваги динамічного управління навантаженням порівняно зі збільшенням експлуатаційної складності та витрат, пов'язаних з впровадженням складних алгоритмів.

Вплив віртуальних комірок на якість радіоканалу заслуговує на особливу увагу, оскільки вони значно покращують надійність та чіткість сигналу завдяки цілеспрямованим методам оптимізації. Віртуальні комірки адаптуються до змін навколишнього середовища, коригуючи параметри передачі, такі як рівні потужності та напрямки формування променя, щоб зменшити вплив перешкод та згасання. Наприклад, у міських середовищах з щільною забудовою віртуальні комірки можуть динамічно переналаштовуватися, щоб уникати перешкод та зменшувати багатопроменеві перешкоди, що призводить до стабільніших з'єднань. Крім того, вони можуть швидко реагувати на коливання умов навколишнього середовища, таких як погода або рух перешкод, підтримуючи високоякісний зв'язок. Тим не менш, ця динамічна адаптивність вимагає передових методів оцінки та управління каналами, включаючи алгоритми машинного навчання, здатні прогнозувати та компенсувати порушення роботи каналів. Ці методи передбачають складну обробку сигналів та вимагають високої обчислювальної

потужності на межі мережі. Як результат, розгортання віртуальних комірок передбачає не лише модернізацію обладнання, але й розробку складних систем керування, здатних підтримувати оптимальні умови каналу в режимі реального часу.

Хоча віртуальні комірки пропонують численні переваги, їх реалізація створює значні проблеми, які необхідно вирішити, щоб реалізувати їхній повний потенціал. Однією з головних проблем є забезпечення безперебійної передачі та координації між віртуальними та фізичними комірками, що має вирішальне значення для підтримки безперебійного з'єднання, коли користувачі переміщуються між різними зонами покриття. Неправильне управління в цьому процесі може призвести до обриву викликів або погіршення сеансів передачі даних, що погіршує враження користувачів. Крім того, підвищена обчислювальна складність, пов'язана з управлінням віртуальними комірками, є серйозною перешкодою. Потреба в обробці в режимі реального часу, безперервному моніторингу та динамічному розподілі ресурсів створює значні накладні витрати на сигналізацію, що може навантажувати мережеву інфраструктуру та потенційно призводити до затримки. Більше того, оскільки віртуальні стільники значною мірою залежать від централізованих механізмів керування та складних алгоритмів, безпека стає нагальною проблемою. Централізовані точки керування можуть стати привабливими цілями для кібератак, а вразливості можуть призвести до витоків даних, перебоїв у наданні послуг або порушення цілісності мережі. Тому розробка надійних протоколів безпеки та стійких архітектур є важливою для захисту мереж віртуальних стільникових мереж від загроз, що постійно розвиваються, одночасно зберігаючи надійність та достовірність [26].

Для систематизації аналізу впливу віртуалізації на функціонування мережі було проведено порівняння традиційної та віртуальної моделей стільників. У таблиці 3.1 наведено ключові відмінності в управлінні радіоресурсами та спектром. Як свідчать дані, перехід до програмно-визначеної архітектури дозволяє відійти від статичного розподілу ресурсів на користь динамічної адаптації до потреб користувачів. Це забезпечує вищу гнучкість інфраструктури, що є

критично важливим для підтримки різнорідного трафіку в екосистемі 5G, включаючи сценарії масового міжмашинного зв'язку (mMTC).

Таблиця 3.1.

Порівняння функціонального впливу традиційних та віртуальних стільників

Параметр	Традиційні стільники	Віртуальні стільники	Ефект від впровадження
Розподіл спектра	Фіксований (статичний)	Динамічний (у реальному часі)	Підвищення ефективності використання спектра
Управління навантаженням	Жорстка прив'язка до БС	Адаптивне перерозподілення	Мінімізація вузьких місць та перевантажень
Якість радіоканалу	Статичні параметри передачі	Адаптивне формування променя	Зменшення впливу згасання та перешкод
Гнучкість інфраструктури	Апаратно-залежна	Програмно-визначена (SDN/NFV)	Швидке масштабування під запити IoT/5G

Заглядаючи в майбутнє, віртуальні комірки готові суттєво вплинути на продуктивність мереж у майбутньому, пропонуючи перспективні шляхи для підвищення швидкості передачі даних та покращення взаємодії з користувачами. Їхня здатність динамічно адаптувати ресурси та оптимізувати якість сигналу дозволяє мережам підтримувати зростаючий попит на програми, що потребують інтенсивного використання пропускної здатності, такі як потокове передавання високої чіткості, віртуальна реальність та пристрої Інтернету речей (IoT). Крім того, віртуальні комірки відіграють важливу роль у сприянні розгортанню 5G та інших мереж, забезпечуючи гнучку та масштабовану інфраструктуру, необхідну для розміщення різноманітних програм, починаючи від автономних транспортних засобів і закінчуючи розумними містами. Їхня здатність до переналаштування в режимі реального часу підтримує гетерогенний характер майбутніх мереж, забезпечуючи ефективне надання послуг у різних випадках використання. Однак ці досягнення також викликають потребу в постійних дослідженнях для вирішення критичних питань, пов'язаних з масштабованістю та сумісністю. Оскільки мережі розширюються та включають багатьох постачальників і

технологій, забезпечення безперебійної інтеграції та стабільної продуктивності стає все складнішим. Постійні зусилля в галузі інновацій та стандартизації є життєво важливими для подолання цих перешкод, дозволяючи віртуальним коміркам реалізувати свій повний потенціал у бездротових мережах наступного покоління.

На завершення, віртуальні комірки представляють собою трансформаційний розвиток у бездротовому зв'язку, пропонуючи значні покращення ефективності використання спектра, балансування навантаження та якості радіоканалів. Вони дозволяють динамічно керувати ресурсами, яке адаптується до змінних потреб та умов навколишнього середовища, зрештою покращуючи продуктивність мережі та взаємодію з користувачем. Однак, впровадження віртуальних комірок не позбавлене труднощів, включаючи забезпечення безперебійної передачі даних, управління обчислювальною та сигнальною складністю, а також усунення вразливостей безпеки. Незважаючи на ці перешкоди, майбутнє віртуальних комірок виглядає багатообіцяючим, з потенціалом для підтримки вищих швидкостей передачі даних та полегшення переходу до 5G та далі. Щоб повною мірою використовувати їхні можливості, необхідні постійні дослідження та розробки для вирішення питань, пов'язаних з масштабованістю, сумісністю та безпекою. У міру розвитку технології віртуальні комірки готові стати наріжним каменем бездротових мереж наступного покоління, формуючи спосіб нашого підключення та спілкування у все більш цифровому світі [27].

3.2. Аналіз показників SINR, інтерференції та стійкості зв’язку у віртуалізованому RAN

Еволюція мереж радіодоступу (RAN) у віртуалізовані середовища здійснила революцію в бездротовому зв'язку, забезпечивши більшу гнучкість, масштабованість та ефективність використання ресурсів. Центральним фактором продуктивності та надійності цих віртуалізованих RAN (vRAN) є взаємопов'язані фактори співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR), динаміка перешкод

та стабільність з'єднання. Розуміння того, як ці елементи взаємодіють, має вирішальне значення для оптимізації продуктивності мережі, забезпечення якості обслуговування (QoS) та підтримки стабільного з'єднання попри складнощі, що виникають унаслідок віртуалізації. Поглиблений аналіз впливу SINR на продуктивність з'єднання, характеру перешкод у віртуалізованих RAN та факторів, що впливають на стабільність з'єднання, ілюструючи, як вони разом формують операційну ефективність сучасних бездротових мереж.

Співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR) – це фундаментальний показник, який кількісно визначає якість бездротового зв'язку шляхом порівняння потужності бажаного сигналу із сумою перешкод та фонового шуму. Високі рівні SINR зазвичай корелюють зі збільшенням пропускної здатності, оскільки приймач може ефективніше декодувати сигнали, що призводить до вищих схем модуляції, таких як 64-QAM або 256-QAM, які вимагають чистішого середовища сигналу. І навпаки, низькі умови SINR, часто спричинені такими факторами, як відстань від базової станції, перешкоди навколишнього середовища або підвищені перешкоди, значно погіршують продуктивність з'єднання. У таких сценаріях з'єднання стає менш надійним, зі збільшенням частоти помилок пакетів та потенційними повторними передачами, що погіршує загальну пропускну здатність та враження користувача. Крім того, коливання SINR, пов'язані з мобільністю користувачів чи коливаннями рівнів перешкод, змушують мережу динамічно адаптуватися за допомогою схем модуляції та кодування (MCS). Методи адаптивної модуляції та кодування (AMC) коригують параметри передачі в режимі реального часу, вибираючи модуляції нижчого порядку або зменшуючи швидкість кодування за поганих умов SINR для підтримки стійкості з'єднання, хоча й ціною зниження швидкості передачі даних. Цей адаптивний процес ілюструє делікатний баланс між пропускною здатністю та надійністю, підкреслюючи критичний вплив SINR на загальну якість та ефективність бездротових з'єднань [28].

Перешкоди у віртуалізованих середовищах RAN виникають з різних джерел, включаючи перешкоди на спільних каналах, міжстільникові перешкоди та міжрівневі перешкоди, кожне з яких посилюється або пом'якшується методами

віртуалізації. Перешкоди на спільних каналах виникають, коли кілька комірок повторно використовують одні й ті ж частотні діапазони, що призводить до перекриття сигналів, особливо в щільних міських умовах. Міжстільникові перешкоди виникають внаслідок перекриття зон покриття сусідніх комірок, що стає більш вираженим у сценаріях з високою щільністю комірок або нерегулярною геометрією комірок.

Вплив інтелектуальних алгоритмів координації на якість радіоканалу проілюстровано на рис. 3.2, де наведено теплові карти розподілу сигналу SINR. На схемі «а» спостерігаються значні зони інтерференції на межах стільників, що є характерним для класичних мереж. Схема «б» демонструє результат впровадження віртуальних стільників із застосуванням технологій Beamforming та CoMP: фокусування енергії сигналу безпосередньо на термінал користувача дозволяє суттєво розширити зону впевненого прийому та підвищити відношення сигнал/шум, мінімізуючи при цьому завади для сусідніх вузлів.

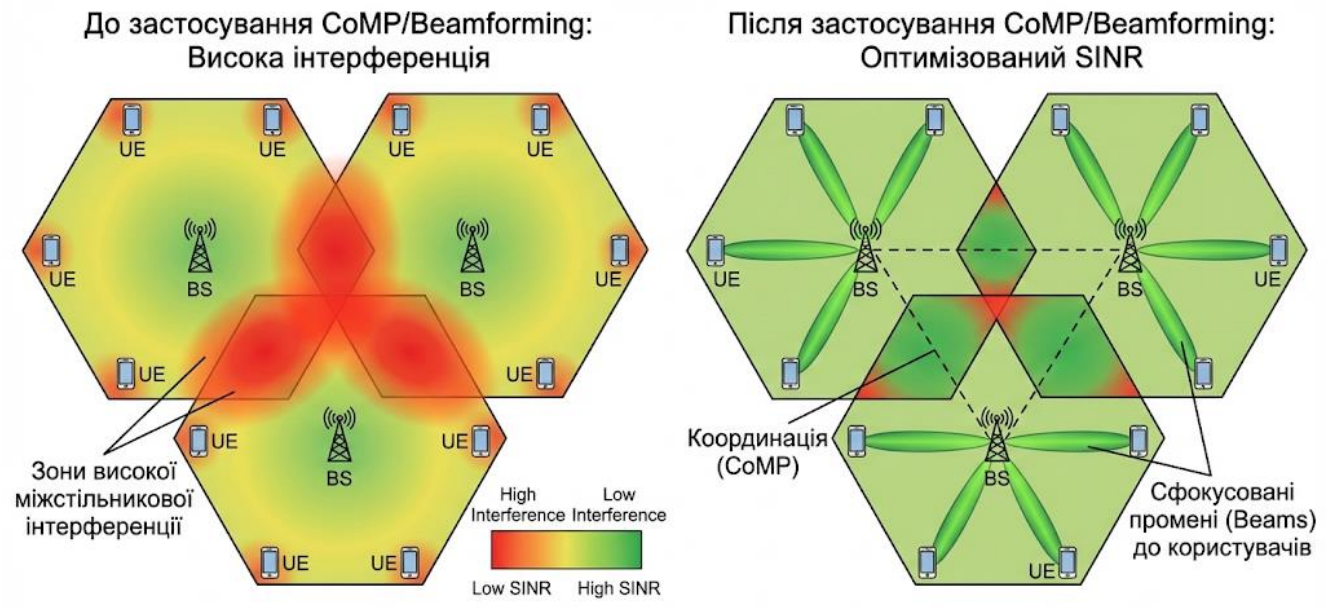


Рис. 3.2. Вплив адаптивного формування променя та координації передачі на мінімізацію міжстільникової інтерференції

Міжрівневі перешкоди, особливо актуальні в гетерогенних мережах, що включають макро-, мікро- та фемто-комірки, вносять додаткову складність,

спричиняючи перешкоди на різних мережевих рівнях. Віртуалізація та спільне використання ресурсів додатково впливають на динаміку перешкод; хоча вони можуть покращити спектральну ефективність шляхом консолідації ресурсів, неправильна ізоляція або неефективний розподіл ресурсів можуть посилити проблеми з перешкодами. Наприклад, спільне використання фізичної інфраструктури між кількома віртуальними мережами може призвести до конкуренції за ресурси, збільшуючи рівень перешкод, якщо не керувати ними належним чином. Для вирішення цих проблем використовуються стратегії координації перешкод, такі як координована багатоточкова передача (CoMP), динамічне управління спектром та адаптивне керування потужністю. Ці методи спрямовані на зменшення впливу перешкод шляхом координації передач, регулювання рівнів потужності або динамічного перерозподілу спектральних ресурсів, тим самим покращуючи загальну продуктивність мережі та враження користувачів. Моделювальні дослідження та реальні розгортання продемонстрували, що ефективне управління перешкодами у віртуалізованих середовищах RAN є життєво важливим для досягнення обіцяного приросту ємності та надійності.

На стабільність з'єднання у віртуалізованих RAN суттєво впливають коливання рівнів перешкод та SINR, що може спричинити непередбачувані зміни якості з'єднання з часом. Часті зміни в характері перешкод – через фактори навколишнього середовища, мобільність користувачів або навантаження мережі – призводять до коливань SINR, які ускладнюють підтримку стабільних з'єднань. Віртуалізація створює додаткові складнощі, такі як конкуренція за ресурси та спільна інфраструктура, які можуть підірвати стабільність якості з'єднання, якщо ними не керувати належним чином. Наприклад, віртуалізація ресурсів дозволяє кільком віртуальним мережам працювати на одному фізичному обладнанні, але без ефективної ізоляції або динамічного управління це може призвести до нестачі ресурсів або перешкод, дестабілізуючи з'єднання. Для протидії цим проблемам було розроблено кілька стратегій. Динамічний розподіл ресурсів передбачає коригування блоків ресурсів у режимі реального часу на основі поточних

мережевих умов для оптимізації стабільності з'єднання. Методи формування променя, що використовують передові антенні решітки, фокусують енергію передачі на певних користувачах, зменшуючи перешкоди та покращуючи стабільність SINR. Крім того, алгоритми, які прогнозують тенденції перешкод та превентивно адаптують розподіл ресурсів, виявилися перспективними у підтримці стабільної якості з'єднання. Ці стратегії разом підвищують довговічність з'єднання, забезпечуючи надійне з'єднання навіть у високодинамічних віртуалізованих середовищах, тим самим підтримуючи високі вимоги до доступності сучасних бездротових додатків.

Якість радіоканалу в умовах щільної забудови значною мірою залежить від здатності мережі мінімізувати завади та підтримувати стабільний рівень сигналу. У таблиці 3.2 узагальнено основні фактори, що впливають на показник SINR у віртуалізованих мережах доступу (vRAN), а також запропоновано методи їх компенсації. Аналіз показує, що використання таких технологій, як Coordinated Multi-Point та адаптивне формування променя (Beamforming), дозволяє не лише стабілізувати з'єднання на межі стільників, але й ефективно керувати просторовою інтерференцією, що безпосередньо покращує досвід користувача (QoE) [29].

Таблиця 3.2.

Фактори впливу на SINR та методи стабілізації у vRAN

Показник / Фактор	Вплив на якість зв'язку	Метод компенсації/оптимізації
Низький SINR	Збільшення помилок пакетів, зниження швидкості	Адаптивна модуляція та кодування (AMC)
Міжстільникова інтерференція	Погіршення сигналу на межах зон покриття	Coordinated Multi-Point (CoMP)
Конкуренція за ресурси	Нестабільність з'єднання через спільну інфраструктуру	Динамічний розподіл блоків ресурсів у реальному часі
Просторові завади	Перекриття сигналів у щільній забудові	Адаптивне формування променя (Beamforming)

У віртуалізованих середовищах RAN перешкоди та SINR тісно пов'язані, причому перешкоди безпосередньо впливають на рівні SINR, що, у свою чергу,

впливає на стабільність з'єднання. Підвищені рівні перешкод, незалежно від того, чи походять вони від джерел, що знаходяться на одному каналі, між комірками або між рівнями, зменшують SINR (коефіцієнт сигналу безперешкодного шуму), збільшуючи знаменник у співвідношенні, тим самим погіршуючи якість бездротового з'єднання. Це зниження SINR призводить до вищих показників помилок, нижчої швидкості передачі даних та підвищеної ймовірності розривів з'єднання, особливо в щільних мережах. Для ефективного управління цим делікатним балансом необхідні механізми зворотного зв'язку в режимі реального часу; мережеві елементи постійно контролюють показники SINR та рівні перешкод, що дозволяє динамічно коригувати параметри передачі та розподіл ресурсів. Ці петлі зворотного зв'язку сприяють стратегіям зменшення перешкод, таким як керування потужністю, адаптивне формування променя та перерозподіл спектру, які працюють синергетично для оптимізації SINR та підвищення стабільності з'єднання. Емпіричні дослідження прикладів цього взаємозв'язку: наприклад, розгортання, що використовують методи скоординованого управління перешкодами, такі як Coordinated Multi-Point (CoMP), продемонстрували значні покращення SINR та, як наслідок, надійності з'єднання. Ці дослідження підкреслюють, що проактивне управління перешкодами, кероване зворотним зв'язком SINR у режимі реального часу, має вирішальне значення для підтримки високоякісних з'єднань у віртуалізованих мережах, особливо враховуючи зростання ущільнення мережі та складності віртуалізації. Незважаючи на досягнення у віртуалізації та стратегіях управління перешкодами, залишається кілька проблем, пов'язаних із повним забезпеченням надійної роботи каналів у віртуалізованих RAN. Сучасні методи віртуалізації часто стикаються з обмеженнями, пов'язаними з ізоляцією ресурсів, затримкою та масштабованістю, що може перешкоджати ефективному зменшенню перешкод та оптимізації SINR.

Наприклад, спільна інфраструктура та конкуренція за ресурси можуть ненавмисно створювати нові шляхи перешкод або посилювати існуючі, підриваючи зусилля щодо стабілізації каналів. Новітні технології пропонують перспективні рішення цих проблем. Штучний інтелект (ШІ) та оптимізація

ресурсів на основі машинного навчання можуть передбачати схеми перешкод та динамічно розподіляти ресурси для запобігання деградації SINR. Крім того, поява нового радіо (NR) 5G вводить такі функції, як масивний MIMO, формування променя та гнучка нумерологія, які за своєю суттю підвищують стійкість до перешкод та покращують стабільність SINR. Однак ці інновації вимагають інтегрованих підходів, що поєднують зменшення перешкод, покращення SINR та стратегії віртуалізації цілісним чином. Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці уніфікованих структур, які використовують ШІ для прогнозного управління перешкодами, включають передові методи антен та оптимізують віртуалізацію ресурсів для безперешкодної адаптації до змінних вимог мережі. Тільки за допомогою таких комплексних рішень ми можемо забезпечити надійність з'єднання, відповідаючи високим очікуванням бездротових мереж наступного покоління та підтримуючи зростаючу різноманітність підключених пристроїв.

На завершення, продуктивність та надійність віртуалізованих RAN критично залежать від складної взаємодії між SINR, перешкодами та стабільністю з'єднання. Високі рівні SINR є важливими для досягнення оптимальної пропускної здатності та підтримки надійних з'єднань, проте вони постійно стикаються з різними формами перешкод, які посилюються методами віртуалізації. Ефективне управління перешкодами – за допомогою механізмів зворотного зв'язку в режимі реального часу та передових стратегій координації – може значно покращити рівні SINR, тим самим підвищуючи стабільність з'єднання в динамічних мережевих середовищах. Незважаючи на помітний прогрес, сучасні підходи до віртуалізації стикаються з обмеженнями, що вимагає інноваційних рішень, таких як оптимізація ресурсів на основі штучного інтелекту та інтеграція функцій 5G NR, які обіцяють подальше підвищення надійності з'єднання. У майбутньому цілісний, багатогранний підхід, що поєднує зменшення перешкод, покращення SINR та стратегії віртуалізації, буде життєво важливим для еволюції стійких, високопродуктивних бездротових мереж. Оскільки ландшафт бездротового зв'язку продовжує розвиватися, розуміння та управління складним

взаємозв'язком між цими факторами залишатиметься першочерговим для забезпечення стабільного, високоякісного з'єднання у все більш складних віртуалізованих середовищах.

3.3. Порівняльна оцінка продуктивності мережі з віртуальними та фізичними стільниками у високонавантажених сценаріях

У швидкозмінному ландшафті телекомунікацій та бездротових мереж розуміння порівняльної продуктивності віртуальних та фізичних комірок за умов високого навантаження є критично важливим для планування, оптимізації та стійкості мережі. Оскільки сучасні мережі все частіше використовують технології віртуалізації для підвищення масштабованості та гнучкості, вкрай важливо оцінити, як ці віртуальні комірки відрізняються від традиційних фізичних комірок з точки зору ключових показників продуктивності, використання ресурсів та надійності. Проаналізувати та порівняти дві конфігурації шляхом детального вивчення їхніх показників продуктивності під час пікових навантажень, ефективності використання ресурсів та загальної стабільності, надаючи розуміння, яке допоможе розробити ефективні стратегії розгортання у вимогливих середовищах. Досліджуючи ці аспекти, ми прагнемо окреслити сильні та обмежені сторони віртуальних та фізичних комірок, сприяючи детальному розумінню їхньої операційної життєздатності у сценаріях з високим трафіком [30].

Показники продуктивності віртуальних та фізичних комірок у сценаріях високого навантаження виявляють значні відмінності в тому, як кожна конфігурація керує вимогами мережі. Пропускна здатність та швидкість передачі даних часто є основними показниками ємності мережі, причому фізичні комірки традиційно пропонують вищу пропускну здатність завдяки виділеним апаратним ресурсам. Емпіричні дослідження, такі як ті, що проводяться на тестових стендах LTE та 5G, демонструють, що фізичні комірки можуть підтримувати вищі пікові швидкості передачі даних завдяки їх прямому доступу до обладнання, тоді як віртуальні комірки іноді стикаються з вузькими місцями, спричиненими накладними витратами віртуалізації. Затримка та час відгуку є однаково

важливими; фізичні комірки, як правило, демонструють меншу затримку під час пікових навантажень, оскільки шляхи передачі даних менше обмежені рівнями гіпервізора, що може призвести до додаткових затримок обробки у віртуальних середовищах. Наприклад, під час подій з високим трафіком, таких як концерти або надзвичайні ситуації, віртуальні комірки можуть демонструвати збільшений час відгуку, який іноді перевищує 20 мілісекунд, порівняно із затримками менше 10 мілісекунд у фізичних конфігураціях.

Оцінка продуктивності в екстремальних умовах, представлена на рис. 3.3, дозволяє виявити критичні пороги затримок для різних типів інфраструктури. Гістограма ілюструє, що при низькому та середньому навантаженні різниця між фізичними та віртуальними рішеннями є мінімальною. Однак, при наближенні до пікових значень (80-100%), у віртуалізованих сегментах спостерігається нелінійне зростання затримки (Latency), спричинене обчислювальними витратами на рівні гіпервізора. Ці дані підкреслюють необхідність ретельного балансування між гнучкістю віртуалізації та жорсткими вимогами до часу відгуку в критичних сценаріях 5G.

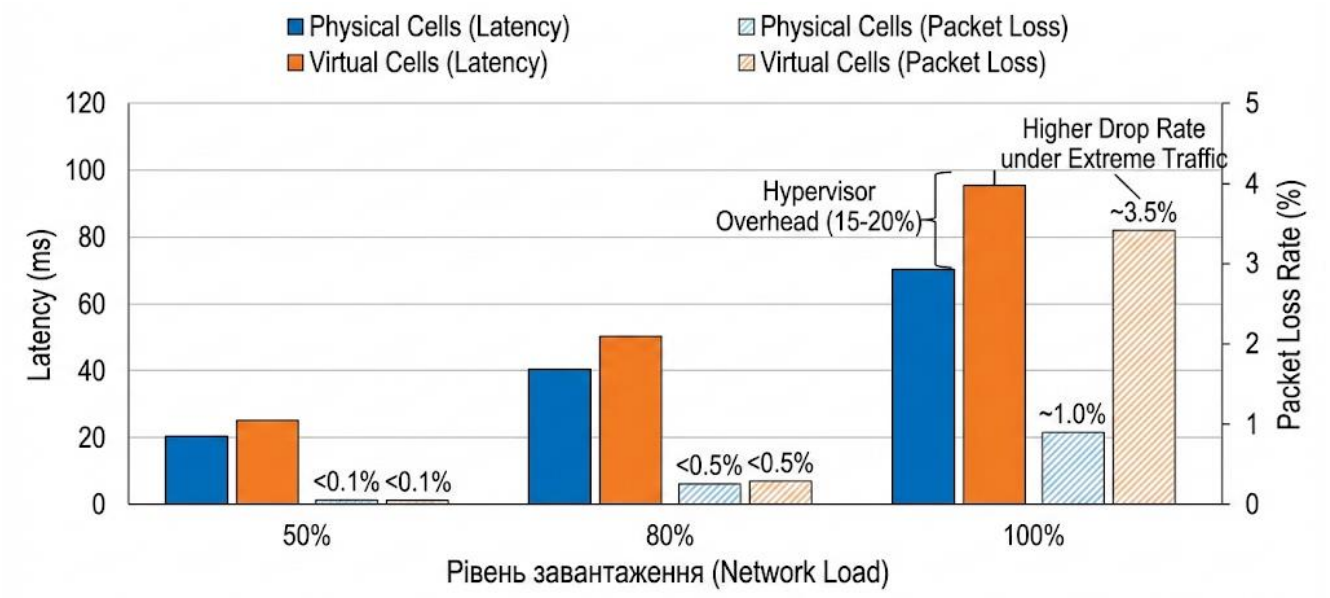


Рис. 3.3. Залежність мережевої затримки від рівня завантаження для фізичної та віртуалізованої архітектур RAN

Втрата пакетів та частота помилок також, як правило, вищі у віртуальних конфігураціях, особливо коли виникає конкуренція за ресурси, що призводить до погіршення якості обслуговування. Ці відмінності підкреслюють, що хоча віртуальні комірки забезпечують гнучкість, їхня продуктивність під час пікових навантажень може бути порушена порівняно з традиційними фізичними комірками, що вимагає ретельного планування потужності.

Використання ресурсів та ефективність є ключовими при оцінці практичності віртуальних та фізичних комірок, особливо зі зростанням потреб мережі. Віртуальні комірки значною мірою залежать від спільних ресурсів процесора, пам'яті та пропускної здатності, що може призвести до неоптимального використання, якщо ними не керувати ефективно. Наприклад, накладні витрати на віртуалізацію, що виникають через гіпервізори та віртуальні комутатори, споживають додаткові цикли процесора та пам'ять, які в іншому випадку могли б бути виділені для обробки мережевого трафіку. В умовах високого навантаження ці накладні витрати можуть значно зменшити ефективну потужність віртуальних комірок, іноді на цілих 15-20%, як задокументовано в дослідженнях, що порівнюють розгортання NFV (віртуалізації мережевих функцій). І навпаки, фізичні комірки виділяють виділені апаратні ресурси, що призводить до більш передбачуваної продуктивності, але за рахунок масштабованості та гнучкості. Однак віртуальні середовища перевершують масштабованість ресурсів; вони можуть динамічно розподіляти або звільняти ресурси на основі моделей трафіку, що дозволяє швидко адаптуватися до коливань навантажень. Наприклад, хмарні віртуальні радіомережі доступу (vRAN) продемонстрували здатність до еластичного масштабування в періоди пікового трафіку, оптимізуючи використання ресурсів без змін фізичного обладнання. Тим не менш, додатковий рівень віртуалізації вносить складність в управління ресурсами, яке має бути ретельно організовано, щоб запобігти зниженню продуктивності під час сценаріїв високого навантаження.

Надійність та стабільність є фундаментальними міркуваннями при оцінці розгортання віртуальних та фізичних комірок в умовах високого мережевого

трафіку. Фізичні комірки, завдяки своєму спеціалізованому обладнанню, за своєю суттю мають вищу стійкість, меншу кількість точок відмови та більш передбачуваний час відновлення. У таких сценаріях, як збої в мережі або збої обладнання, фізичні комірки зазвичай забезпечують швидше виявлення та відновлення несправностей — часто протягом кількох секунд — мінімізуючи перебої в обслуговуванні. Віртуальні комірки, хоча й пропонуючи підвищену гнучкість, стикаються з проблемами, пов'язаними зі стійкістю мережі; віртуалізовані середовища можуть бути більш схильними до збоїв, що виникають внаслідок збоїв гіпервізора, конкуренції за ресурси або програмних помилок. Наприклад, під час імітованих стрес-тестів з високим трафіком віртуальні комірки демонстрували вищі показники відключень — у деяких випадках до 10% — порівняно з майже нульовими показниками у фізичних розгортаннях. Час відновлення віртуальних комірок залежить від стійкості базової інфраструктури віртуалізації; У добре спроектованих системах відновлення можна досягти протягом кількох хвилин, але це значно варіюється залежно від складності експлуатації. Механізми відмовостійкості, такі як міграція в реальному часі та резервні віртуальні екземпляри, можуть зменшити деякі ризики; однак їх реалізація створює додаткові накладні витрати та складність. Зрештою, фізичні комірки, як правило, забезпечують більш стабільну та передбачувану роботу в екстремальних умовах трафіку, хоча віртуальні комірки можуть досягти порівнянної стабільності за допомогою складних стратегій управління відмовами.

Під час оцінки економічної ефективності та складності розгортання віртуальних та фізичних комірок численні фактори впливають на їхню придатність для сценаріїв високого навантаження. Капітальні витрати (CapEx) на фізичні комірки спочатку, як правило, вищі, оскільки це передбачає придбання спеціалізованого обладнання, такого як базові станції, антени та мережеве обладнання. На противагу цьому, віртуальні комірки, які часто реалізуються через NFV, використовують існуючі центри обробки даних та хмарну інфраструктуру, значно знижуючи початкові витрати. Операційні витрати (OpEx) також різняться; віртуальні конфігурації виграють від легшого обслуговування, оскільки

оновлення, виправлення та зміни конфігурації можна виконувати централізовано та віддалено, мінімізуючи відвідування місць та фізичне втручання. Встановлення та масштабування, як правило, менш складні для віртуальних комірок, що дозволяє швидко розгортати нові послуги та коригувати їх для врахування стрибків трафіку. Ця гнучкість призводить до довгострокової економії коштів, особливо в щільному міському середовищі або динамічних сценаріях, де необхідні часті оновлення. Однак початкове налаштування віртуальної інфраструктури вимагає значних знань у технологіях віртуалізації та оркестрації мережі, що може призвести до ускладнень на етапі міграції. З часом здатність динамічно перерозподіляти ресурси та використовувати хмарні технології масштабування може забезпечити значну віддачу від інвестицій, що робить віртуальні комірки привабливим варіантом для операторів, які прагнуть гнучкості та економічної ефективності. Тим не менш, баланс між початковою складністю розгортання та постійними операційними перевагами необхідно ретельно контролювати, щоб реалізувати всі економічні переваги віртуалізованих мережевих архітектур.

Вибір між фізичною та віртуальною реалізацією стільників потребує ретельного оцінювання компромісів між продуктивністю та економічною ефективністю, особливо в умовах пікових навантажень. У таблиці 3.3 представлено порівняльну характеристику обох підходів за критичними критеріями, такими як затримка, масштабованість та вартість розгортання. Хоча фізичні стільники демонструють кращу стабільність для сервісів з ультранизькою затримкою (URLLC), віртуальні стільники мають беззаперечну перевагу в питаннях еластичності та зниження капітальних витрат (CapEx), що робить їх оптимальним рішенням для динамічних міських середовищ.

Міркування безпеки є критично важливими при порівнянні віртуальних та фізичних комірок, особливо в умовах високого навантаження, де можна використовувати вразливості. Віртуалізована інфраструктура за своєю природою створює додаткові поверхні атаки, такі як гіпервізори, віртуальні комутатори та хмарні інтерфейси, які можуть стати ціллю кіберзагроз. Зловмисники можуть

спробувати використати вразливості віртуалізації для отримання несанкціонованого доступу або порушення роботи мережевих послуг.

Таблиця 3.3.

Порівняльна характеристика фізичних та віртуальних стільників за умов пікового трафіку

Критерій порівняння	Фізичні стільники	Віртуальні стільники	Оптимальне застосування
Пропускна здатність	Вища (виділене залізо)	Нижча (накладні витрати 15-20%)	Фізичні — для стабільних магістралей
Затримка (Latency)	Низька (<10 мс)	Середня (може перевищувати 20 мс)	Фізичні — для URLLC додатків
Масштабованість	Обмежена апаратним ресурсом	Висока (еластичне масштабування)	Віртуальні — для динамічних подій
Надійність (Стійкість)	Висока (менше точок відмови)	Залежить від гіпервізора (відключення до 10%)	Фізичні — для критичної інфраструктури
Економічність (CapEx)	Висока (купівля БС)	Низька (використання хмар)	Віртуальні — для щільного міста

І навпаки, фізичні комірки з виділеним обладнанням та меншою залежністю від спільної інфраструктури, як правило, мають нижчий профіль ризику; однак вони не застраховані від фізичного втручання або атак на основі апаратного забезпечення. Засоби контролю безпеки у віртуальних середовищах часто включають надійні заходи безпеки гіпервізора, шифрування інтерфейсів управління та сегментацію віртуальних мереж для стримування порушень. У фізичних конфігураціях використовуються традиційні протоколи безпеки, такі як фізичний контроль доступу, брандмауери та системи виявлення вторгнень. Незважаючи на ці заходи, потенційний вплив порушень безпеки різниться: порушення віртуального середовища можуть призвести до широкомасштабних перебоїв у роботі послуг, витоків даних та порушення цілісності мережі, особливо

якщо безпека гіпервізора або хмари є недостатньою. Тому забезпечення безпеки у віртуальних комірках вимагає комплексних стратегій, що включають багаторівневий захист, постійний моніторинг та швидке реагування на інциденти, тоді як фізичні комірки отримують вигоду від притаманної ізоляції, але все ще вимагають пильних практик фізичної та мережевої безпеки.

На завершення, порівняльна оцінка віртуальних та фізичних комірок за сценаріїв високого навантаження розкриває складний ландшафт продуктивності, використання ресурсів, надійності, вартості та безпеки. Фізичні комірки зазвичай перевершують віртуальні аналоги за пропускною здатністю, затримкою та стабільністю завдяки спеціалізованому обладнанню та простішій архітектурі, що робить їх придатними для середовищ, що вимагають максимальної надійності. І навпаки, віртуальні комірки перевершують масштабованість, гнучкість та економічну ефективність, пропонуючи швидке розгортання та динамічне управління ресурсами, необхідні для сучасних мереж з високим навантаженням. Безпека залишається критичною проблемою для віртуальної інфраструктури, що вимагає надійних заходів захисту від кіберзагроз, тоді як фізичні комірки отримують вигоду від притаманної фізичної ізоляції. Зрештою, вибір між віртуальними та фізичними комірками залежить від конкретних операційних пріоритетів, бюджетних обмежень та стратегій управління ризиками. Оскільки технології віртуалізації продовжують розвиватися, інтеграція сильних сторін обох підходів може забезпечити оптимальні рішення — використання віртуальної гнучкості з надійністю фізичної інфраструктури — для задоволення вимогливих потреб майбутніх мережевих середовищ з високим навантаженням.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексний аналіз ефективності віртуальних стільників у мережах 5G. За результатами дослідження сформульовано наступні висновки:

За Розділом 1:

1. Встановлено, що перехід до архітектури 5G базується на глибокій інтеграції технологій SDN та NFV, що дозволяє відійти від жорсткої апаратної залежності та реалізувати концепцію програмно-визначених мереж.

2. Визначено, що віртуальний стільник є логічним об'єктом, який формується навколо користувача, що дозволяє мінімізувати кількість хендоверів та забезпечити безперервність з'єднання у динамічних сценаріях.

3. Доведено, що використання віртуалізації в 5G забезпечує необхідну гнучкість для підтримки різнорідних сервісів (eMBB, URLLC, mMTC) в межах однієї фізичної інфраструктури.

За Розділом 2:

1. Обґрунтовано вибір ключових метрик (SINR, затримка, пропускна здатність), які дозволяють всебічно оцінити продуктивність віртуалізованої мережі доступу.

2. Розроблено методологію моделювання на основі системної динаміки, що дозволяє враховувати нелінійні взаємодії між компонентами мережі та петлі зворотного зв'язку в алгоритмах управління.

3. Визначено послідовність проведення експериментів, яка передбачає ітеративне калібрування моделі та аналіз її чутливості до зовнішніх чинників (зміна кількості користувачів, обсяг трафіку).

За Розділом 3:

1. Проведено порівняльний аналіз, який показав, що віртуальні стільники демонструють вищу ефективність у використанні спектра та балансуванні навантаження за рахунок динамічного перерозподілу ресурсів у реальному часі.

2. Виявлено «компроміс продуктивності»: за умов критичного навантаження (понад 80%) віртуалізована архітектура вносить додаткову затримку (близько 15-20%), зумовлену накладними витратами програмного забезпечення, що необхідно враховувати при проектуванні систем реального часу.

3. Підтверджено, що впровадження інтелектуальних методів управління, таких як Beamforming та CoMP у складі віртуальних стільників, дозволяє суттєво знизити рівень міжстільникової інтерференції та підвищити якість сигналу (SINR) для користувачів на межі покриття.

Загальний підсумок:

Результати роботи підтверджують, що віртуалізація стільників є ключовим інструментом підвищення продуктивності мереж 5G. Попри наявні виклики у вигляді додаткових обчислювальних затримок, переваги у масштабованості, гнучкості та економічній ефективності роблять цей підхід пріоритетним для розгортання сучасних телекомунікаційних мереж.