

ВСТУП

Інтенсивний розвиток технологій в останні роки призвів до появи великої кількості багатофункціональних абонентських пристроїв, що спричинило різке зростання трафіку у мережах мобільного зв'язку. Відповідно до прогнозів компанії Cisco, до 2030 року загальна кількість мобільних пристроїв зросте до 125 мільярдів, що в понад десять разів перевищуватиме населення планети. Тому впродовж останніх років активно ведуться дослідження у напрямку широкого впровадження мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління. Серед основних викликів, які поставлені перед сучасними мережами мобільного зв'язку, є висока густина та складність багаторівневих гетерогенних мереж, що не дає змоги ефективно планувати інфраструктуру базових станцій та їхню опорну транспортну систему. Крім того, відсутність єдиної площини керування знижує ефективність гетерогенної мережі в умовах значної варіації абонентського навантаження за рахунок неефективного використання пропускної здатності комірок гетерогенної мережі. Гетерогенні мережі характерні більш частими хендoverами у зв'язку із малим радіусом комірок. За великої кількості абонентів та їхньої відносно великої мобільності спостерігається висока варіація навантаження у комірках, що потребує єдиної централізованої площини керування та прийняття рішення стосовно розподілу частотних ресурсів. Із врахуванням складності багаторівневої структури, в гетерогенних мережах мобільного зв'язку особливого значення також набувають геометричні моделі планування та розроблені на їх основі алгоритми балансування навантаження.

У монографії пропонується розроблення наукових основ та практичних рекомендацій щодо побудови загальнодержавної інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури для розгортання гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G. Пропоновані рішення дають можливість спростити процес розгортання мережі як в локальному, так і в глобальному масштабі, знизити капітальні та експлуатаційні витрати, забезпечити високу надійність мережі та якість надання послуг, а також запропонувати нові типи сервісів, які неможливо реалізувати з використанням існуючих технологій.

ЗМІСТ

Вступ	8
Розділ 1. Аналіз сучасного стану розвитку мереж мобільного зв'язку	9
1.1. Вимоги та потенційні технічні рішення для розвитку мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління	9
1.2. Просторове ущільнення безпроводної інфраструктури мережі мобільного зв'язку для підвищення абонентської ємності мережі.....	12
1.3. Конвергенція протоколів безпроводного доступу в гетерогенних мережах мобільного зв'язку.....	14
1.4. Спектральне ущільнення мереж мобільного зв'язку для підвищення пікових швидкостей передавання для кінцевих користувачів	18
1.4.1. Використання радіочастотних ресурсів міліметрового діапазону довжин хвиль.....	19
1.4.2. Ущільнення передавально-приймальних антенних систем МІМО	20
1.4.3. Спектральне ущільнення безпроводної опорної транспортної інфраструктури.....	21
1.5. Функціональні особливості та вимоги до радіоінтерфейсів мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління	22
1.6. Поточні невирішені завдання для розгортання гетерогенних мереж мобільного зв'язку в Україні.....	25
1.6.1. Проблема інтерференції у гетерогенних мережах мобільного зв'язку	25
1.6.2. Фізичні обмеження радіоінтерфейсів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку	27
1.6.3. Проблема балансування навантажень та управління хендвером у багаторівневих гетерогенних мережах	28
1.6.4. Проблема синтезу оптимальних коміркових структур гетерогенних мереж мобільного зв'язку.....	29
1.7. Недоліки сучасних стандартів та основні невирішені завдання для комплексного підвищення ефективності гетерогенних інформаційно- комунікаційних систем у довгостроковій перспективі.....	32
Розділ 2. Розроблення методу динамічного перерозподілу ресурсів між різними частотними діапазонами, технологіями та територіальними зонами для підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж 4G/5G	45
2.1. Метод динамічного перерозподілу ресурсів між різними частотними діапазонами для підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж.....	45

2.1.1. Інтеграція малих комірок з нерегулярною структурою в існуючу мережу оператора зв'язку	46
2.1.2. Спосіб посегментного розділення на пікокомірки з використанням діаграм Вороного	49
2.1.3. Метод частотного планування та диференціація трафіку згідно з вимогами до рівня радіодоступу для забезпечення широкосмугового доступу	50
2.1.4. Підхід до адаптивного формування структури радіодоступу з гарантуванням необхідної якості обслуговування та можливістю широкосмугової передачі	55
2.1.5. Дослідження запропонованих рішень з використанням імітаційного моделювання	60
2.1.6. Метод впровадження технології D2D у гетерогенних мережах 5G	66
2.2. Метод динамічного перерозподілу ресурсів між різними технологіями для підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж 5G.....	92
2.2.1. Метод інтелектуального вертикального хендвера на основі гетерогенної мережевої платформи	93
2.2.2. Багатокритерійний алгоритм вертикального хендвера користувачького навантаження.....	96
2.2.3. Математичне моделювання процесу прийняття рішення щодо вертикального хендвера в гетерогенній мережі на основі використання нечіткої логіки	99
2.2.4. Імітаційне моделювання процесів динамічного розподілу ресурсів у гетерогенній мережевій платформі безпроводного доступу.....	105
2.2.5. Аналіз результатів моделювання.....	109
2.3. Метод динамічного перерозподілу ресурсів між різними територіальними зонами для підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж 5G.....	114
2.3.1. Моделі комутації та розподілу потоків даних у вузлах оптичної транспортної мережі інформаційно-комунікаційної системи національного масштабу.....	115
2.3.2. Алгоритми утворення віртуальних каналів та протоколи сигналізації у мережі з комутацією блоків	129
2.3.3. Розроблення архітектури програмно-конфігурованої транспортної мережі з оптичною комутацією блоків	140
Розділ 3. Розроблення методів організації захищених каналів зв'язку мереж 4G/5G.....	147
3.1. Розроблення вдосконалених систем зв'язку для потреб військового застосування.....	147

3.1.1. Вимоги до сучасних систем зв'язку військового призначення	147
3.1.2. Особливості функціонування гетерогенних безпроводних систем військового зв'язку.....	149
3.2. Модифікований метод синтезу сигнально-кодових конструкцій з ортогональним частотним мультиплексуванням для організації захищених безпроводних каналів зв'язку військового призначення.....	150
3.2.1. Математична модель радіосигналу з ортогональним частотним мультиплексуванням	150
3.2.2. Математична модель сигналу з квадратурно-амплітудною модуляцією.....	152
3.2.3. Математична модель модифікованого сигналу з напів квадратурно-амплітудною модуляцією.....	153
3.2.4. Використання асоціативності піднесучих для підвищення захищеності радіоканалів військового зв'язку для різних типів квадратурно-амплітудної модуляції	154
3.2.5. Дослідження характеристик радіоканалів із використанням модифікованого методу синтезу сигнально-кодових конструкцій з ортогональним частотним мультиплексуванням	158
Розділ 4. Розроблення методу управління інформаційними потоками та забезпечення якості обслуговування в мережах 5G.....	163
4.1. Декомпозиція фізичної топології програмно-конфігурованої архітектури 5G на віртуальні моносервісні мережі	163
4.2. Модель віртуалізованого пакетного маршрутизатора зі статичним та динамічним виділенням обчислювальних ресурсів	169
4.3. Аналітичне представлення параметрів якості обслуговування віртуальної інфраструктури.....	176
4.4. Модель мережевого пристрою з віртуалізацією ресурсів	178
4.5. Покращення параметрів QoS на основі методу адаптивного управління структурними параметрами віртуальних маршрутизаторів.....	182
4.6. Основні блоки, необхідні для розроблення імітаційної моделі маршрутизатора з віртуалізацією та без віртуалізації ресурсів	186
4.7. Дослідження статистичних характеристик трафіку мережі мобільного зв'язку за допомогою мережних аналізаторів	190
4.7.1. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для веб сервісів	191
4.7.2. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для сервісів потокового відео.....	195
4.7.3. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для сервісів IP-телефонії.....	199
4.8. Моделювання статистичних характеристик агрегованого трафіку в опорній мережі мобільного зв'язку та схема моделі пакетного маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів.....	205

4.9. Моделювання системи обслуговування потоків даних у вузлах програмно-конфігурованої мережі із використанням механізмів віртуалізації	212
4.9.1. Моделювання та порівняння систем обслуговування інформаційних потоків зі статичною реконфігурацією ресурсів маршрутизатора та обробкою пакетів за порядком черги fifo	213
4.9.2. Моделювання та порівняння системи обслуговування інформаційних потоків з динамічною реконфігурацією ресурсів маршрутизатора та обробкою пакетів за порядком черги fifo	227
4.9.3. Моделювання систем обслуговування вхідних потоків зі статичною і динамічною реконфігурацією ресурсів вузла та порівняння з пріоритетною обробкою пакетів	236
4.10. Дослідження впливу методу управління структурними параметрами віртуальних маршрутизаторів на якість обслуговування потоків	239
Розділ 5. Розроблення методики ситуативного розгортання безпроводної інфраструктури мережі 5G	249
5.1. Застосування самоорганізованих систем для побудови безпроводних польових мереж 5G військового зв'язку	249
5.2. Ситуативне розгортання мереж радіозв'язку спеціального призначення на основі технології міжтермінального зв'язку D2D	258
5.2.1. Моделі конвергенції технологій радіозв'язку за ситуативного розгортання мереж спеціального призначення	258
5.3. Планування та розподіл спектральних ресурсів за ситуативного розгортання мереж мобільного зв'язку 5G	261
5.3.1. Моделі розподілу спектру між базовими станціями LTE та міжтермінальними каналами D2D	261
5.3.2. Вирішення проблеми інтерференції за ситуативного розгортання мереж 5G на основі D2D	264
5.3.3. Імітаційне моделювання процесу уникнення інтерференційних завад за ситуативного розгортання каналів D2D у частотному діапазоні базових станцій	269
5.4. Гетерогенна архітектура мережі 5G із ситуативним розгортанням радіоканалів для координованого надання сервісів спеціального призначення	271
5.4.1. Архітектура багаторівневої гетерогенної мережі для мобільних хмарних обчислень на основі міжтермінальної взаємодії	271
5.4.2. Організація процесу передавання інформаційних потоків у мережі мобільних хмарних обчислень	275
5.4.3. Метод багаторівневої реплікації контенту в гетерогенній мережі на основі D2D	278

5.4.4. Моделювання та дослідження ефективності запропонованої гетерогенної архітектури	281
Розділ 6. Розроблення методики проєктування безпроводної мережі 5G з урахуванням особливостей цільового застосування інформаційно-комунікаційної системи	284
6.1. Формування структури мережі коміркового зв'язку 5G	284
6.1.1. Методика проєктування гетерогенних мереж мобільного зв'язку з використанням моделей стохастичної геометрії	288
6.1.2. Планування покриття гетерогенної багаторівневої мережі мобільного зв'язку.....	295
6.1.3. Планування повторного використання частот за багаторівневого розгортання гетерогенних мереж мобільного зв'язку	297
6.1.4. Моделювання показників ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку	301
Розділ 7. Розробка системи моніторингу якості телекомунікаційних послуг під час впровадження гетерогенних мереж мобільного зв'язку.....	305
7.1. Концептуальна модель гетерогенної мобільної мережі 5G з використанням технології Big Data для моніторингу даних.....	305
7.2. Етапи підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі централізованої системи моніторингу запасами ресурсів та параметрів QoS	313
7.3. Постановка імітаційного моделювання процесу оптимізації гетерогенної мережі	317
7.4. Практична реалізація системи моніторингу та обробки великих об'ємів даних, отриманих шляхом імітаційного моделювання гетерогенної мобільної мережі	319
7.5. Генерація, збір та аналіз даних процесу функціонування гетерогенної мережі із реалізованим рішенням обробки великих даних	328
7.5.1. Генерація даних процесу функціонування гетерогенної мережі	328
7.5.2. Збір та аналіз даних процесу функціонування гетерогенної мережі із реалізованим рішенням обробки великих даних	333
7.6. Управління ресурсами та якістю обслуговування в гетерогенній мережі.....	335
7.7. Оптимізація гетерогенної мережі та оцінка ефективності використання запропонованої системи моніторингу.....	340
7.8. Якісний економічний аналіз та рекомендації щодо впровадження отриманих результатів для побудови мереж 4G/5G.....	350
Висновки.....	354
Список використаних джерел.....	360