

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ГАРКУША Сергій Володимирович

УДК 621.391

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ
ПРОДУКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ
ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ МЕРЕЖНИХ РЕСУРСІВ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри телекомунікаційних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КЛИМАШ Михайло Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри телекомунікацій

доктор технічних наук, професор
СТРЕЛКОВСЬКА Ірина Вікторівна,
Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,
директор Навчально-наукового інституту
інфокомунікацій та програмної інженерії

доктор технічних наук, професор
СУНДУЧКОВ Костянтин Станіславович,
Інституту телекомунікаційних систем Національного
технічного університету України "Київський
політехнічний інститут",
професор кафедри інформаційно-телекомунікаційних
мереж

Захист відбудеться 28 листопада 2014 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий 21 жовтня 2014 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є.В. Дуравкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із ключових проєктів загальнонаціонального значення, у зв'язку з розвитком інформаційного суспільства України, є створення мультисервісної телекомунікаційної інфраструктури, що ґрунтується на застосуванні ефективних засобів забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) одночасно за множиною різнорідних показників (продуктивність, середня затримка, джиттер, імовірність втрат пакетів та ін.). Як показує практика в архітектурі сучасних телекомунікаційних систем (ТКС) постійно підвищується роль безпроводових технологій, у яких основним стримуючим фактором упровадження новітніх інфокомунікаційних послуг, є відносно невисока (порівняно із проводовими рішеннями) продуктивність. У зв'язку з цим, як показав проведений аналіз, одним з ефективних шляхів підвищення продуктивності й поліпшення основних показників якості обслуговування в безпроводових ТКС є не лише збільшення обсягу доступного мережного ресурсу, але й забезпечення його ефективного розподілу (управління) шляхом удосконалення відповідних мережних протоколів і механізмів, а також покладених в їх основу математичних моделей і методів.

У теорії управління мережними ресурсами, що є складовою теорії телекомунікаційних систем, накопичений значний теоретичний матеріал і практичний досвід. Вагомий внесок у розвиток моделей і методів управління мережними ресурсами, у тому числі безпроводових телекомунікаційних систем, внесли зарубіжні вчені, серед яких Zander J., Reed J. H., Cardei M., Cardei I., Du. D. Z., Jo M., а також вчені України та ближнього зарубіжжя – Беркман Л. Н., Бунін С. Г., Вишнівський В. М., Воробієнко П. П., Климаш М. М., Комашинський В. І., Ляхов А. І., Поповський В. В., Романюк В. А., Стрелковська І. В., Сундучков К. С.

При цьому, незважаючи на досягнуті останнім часом успіхи у сфері безпроводових технологій, досить багато телекомунікаційних проблем і задач розв'язується вирішується на основі евристичних підходів до розподілу мережних ресурсів, не забезпечуючи належного теоретичного обґрунтування технологічних рішень щодо підвищення продуктивності ТКС у цілому. Під час розробки нових моделей і методів оптимального розподілу мережних ресурсів у безпроводових ТКС повинен враховуватися ряд вимог, до яких слід зарахувати: облік неоднорідності сучасних безпроводових ТКС, а також типу й характеру трафіка, що в них циркулює; забезпечення необхідного рівня масштабованості кінцевих рішень і необхідної якості обслуговування; підвищення рівня узгодженості рішень щодо оптимального розподілу різнотипних мережних ресурсів безпроводових телекомунікаційних систем.

Якнайповніше задовольнити перераховані вимоги можливо лише в ході детального перегляду існуючих моделей, методів і самої теорії розподілу мережних ресурсів у безпроводових ТКС, а не тільки шляхом оновлення версій ключових протокольних рішень або формальної зміни назв окремих телекомунікаційних технологій. Це пов'язано із застосуванням та адаптацією під особливості безпроводових рішень математичних підходів, які раніше добре себе зарекомендували в інших сферах, до моделювання, аналізу й синтезу безпроводових ТКС,

грунтованих на теорії гіперграфів, апараті тензорного числення й аналізу, методах дослідження операцій, що повинно позначитися на підвищенні рівня системності отримуваних рішень, і їх ефективності загалом. У зв'язку з цим, актуальною є наступна науково-прикладна проблема, яка полягає в розвитку теорії оптимального розподілу мережних ресурсів безпроводових ТКС в умовах їх обмеженості шляхом розробки й удосконалення засобів підвищення їх продуктивності на основі використання гіперграфових і тензорних моделей та методів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Робота виконана відповідно до положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» та з «Основними положеннями розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007–2015 роки».

Матеріали дисертації були використані в ряді науково-дослідних робіт (НДР): «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (тема №261, ДР №0111U002627) та НДР №271-1 (ДР 012U000010), які виконувались Харківським національним університетом радіоелектроніки (ХНУРЕ).

Мета роботи – підвищення ефективності безпроводових телекомунікаційних систем за основними показниками якості обслуговування.

У рамках дисертаційної роботи в ході вирішення наукової проблеми були поставлені й розв'язані такі наукові задачі дослідження:

- аналіз сучасного стану й тенденцій розвитку безпроводових ТКС, а також засобів підвищення їх продуктивності на підставі оптимального розподілу мережних ресурсів;
- формулювання вимог до перспективних моделей і методів підвищення продуктивності безпроводових ТКС;
- розробка моделей і методів розподілу частотних каналів та потокової маршрутизації в безпроводових ТКС стандарту IEEE 802.11 із використанням гіперграфів і графів Кьоніга;
- розробка декомпозиційної моделі та ієрархічно-координаційного методу розподілу частотних каналів у безпроводових ТКС стандарту IEEE 802.11 із метою підвищення масштабованості рішень, що отримуються;
- розробка системи математичних моделей оптимального розподілу частотного й часового ресурсів у безпроводових ТКС стандарту IEEE 802.16, що функціонують у режимах «точка-багатоточка» (point-to-multipoint) і mesh;
- розробка системи математичних моделей оптимального розподілу частотного й часового ресурсів у безпроводових ТКС технології LTE;
- удосконалення тензорних моделей шляхом урахування можливих втрат пакетів на вузлах мережі, викликаних перевантаженням буфера черг, із формулюванням умов забезпечення якості обслуговування одночасно за часовими та швидкісними показниками, а також показниками надійності;
- аналіз ступеня адекватності розроблених моделей і методів, а також оцінка ефективності рішень, що отримуються, відносно оптимального розподілу мережних ресурсів;

- розробка рекомендацій із практичної реалізації отриманих моделей і методів підвищення продуктивності в сучасних і перспективних безпроводових телекомунікаційних системах.

Об'єктом дослідження є процес підвищення продуктивності безпроводових ТКС на основі оптимального розподілу мережних ресурсів.

Предметом дослідження є теорія, моделі та методи підвищення продуктивності на основі оптимального розподілу мережних ресурсів безпроводових ТКС.

Методи дослідження. У ході досліджень, проведених у дисертаційній роботі, були використані: під час розподілу частотного ресурсу в mesh-мережах стандартів IEEE 802.11 і 802.16 – теорія гіперграфів; під час потокової маршрутизації в mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 – графи Кьоніга; під час розробки моделей та методів ієрархічної маршрутизації в mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 знайшла своє застосування теорія ієрархічних багаторівневих систем; під час оптимізації розподілу мережних ресурсів у мережах стандартів IEEE 802.11, IEEE 802.16 і технології LTE використовувались оптимізаційні методи теорії дослідження операцій і пакет прикладних програм числового аналізу MATLAB/TOMLAB; під час отримання умов забезпечення якості обслуговування за кількома різнорідним показниками використаний апарат тензорного числення та аналізу; для кількісної оцінки показників QoS використовувався апарат теорії масового обслуговування; у ході імітаційного моделювання задіяні можливості мережного симулятора ns3 і LTE Downlink Resource Element Visualization v1.1.

Наукова новизна отриманих результатів.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є розвиток теорії оптимального управління мережними ресурсами безпроводових ТКС за рахунок розробки моделей та методів підвищення продуктивності, які забезпечують виконання вимог за множиною різнорідних QoS-показників. У рамках головного результату отримані наступні наукові результати:

1. Уперше запропонована топологічна модель багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж стандарту IEEE 802.11, яка представлена гіперграфами, що дозволило забезпечити більш повне урахування особливостей побудови подібного роду мереж як на етапі формулювання вихідних даних (під час опису зон стійкого прийому), так і в ході розв'язання задачі щодо розподілу частотних каналів, які не перекриваються (під час формулювання умов зв'язності mesh-станцій, доменів колізій та мережі в цілому).

2. Удосконалена функціональна модель розподілу частотних каналів, що не перекриваються, у багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11, новизна якої полягає, по-перше, у її двохіндексному характері, що дозволило істотно знизити розмірність задачі й підвищити, тим самим, масштабованість кінцевих рішень; по-друге, в отриманні умов зв'язності mesh-станцій, доменів колізій та мережі в цілому, які справедливі для випадку використання трьох і більше частотних каналів, що не перекриваються. Це дозволило розширити сферу застосування запропонованих рішень. Уперше запропоновано критерій оптимальності розв'язання задачі розподілу частотних каналів, що представлений квадратичною формою від числа станцій, які формують до-

мени колізій у рамках тієї або іншої зони стійкого прийому, що дозволило забезпечити більш ефективне використання (балансування) мережних ресурсів, числа mesh-станцій у доменах колізій, а також підвищити продуктивність мережі та якість обслуговування загалом.

3. Удосконалено двохіндексну математичну модель розподілу частотних каналів, що не перекриваються, шляхом її декомпозиційного представлення, яке полягало в її доповненні умовою ідентичного управління станціями, що перебувають одночасно в декількох зонах стійкого прийому, і декомпозиційним поданням умов зв'язності mesh-мережі, що забезпечило відносну незалежність розв'язання задач розподілу частотних каналів, які не перекриваються, за окремими доменами колізій. Уперше запропоновано ієрархічно-координаційний метод розподілу частотних каналів, що не перекриваються, у багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11, новизна якого полягає у введенні дворівневої ієрархії mesh-станцій на основі принципу прогнозування взаємодій, що дозволило значно знизити розмірність задачі нижнього рівня (рівня mesh-станцій) без істотного завантаження координаторів верхнього рівня. Використання запропонованих моделі та методу, з технологічної точки зору, сприяло зниженню інерційності управління та обсягів циркулюючої в мережі інформації про стан mesh-мережі, яку необхідно постійно оновлювати в ході оптимізації розподілу частотних каналів, а в підсумку свідчило про підвищення масштабованості кінцевих рішень.

4. Отримала подальший розвиток математична модель потокової маршрутизації в багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11. Новизна моделі полягає в тому, що для адекватної формалізації процесів потокової маршрутизації використовувалося плоске кьонігове представлення багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж, топологія яких описувалася гіперграфами. Це дозволило на основі більш повного врахування особливостей побудови подібного класу мереж формалізувати умови збереження потоку як в окремих станціях, так і в усіх доменах колізій, на які декомпозиціювалась вихідна mesh-мережа після розв'язання задачі розподілу частотних каналів, що не перекриваються.

Уперше запропоновано модель узгодженого розв'язання задач розподілу частотних каналів, що не перекриваються, і потокової маршрутизації в багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 із використанням гіперграфів і графів Кьоніга. Якщо в раніше відомих рішеннях задача розподілу частотних каналів, що не перекриваються, була орієнтована на отримання зв'язної збалансованої за пропускну здатністю структури mesh-мережі, то в рамках запропонованої моделі розв'язання зазначених задач підпорядковане єдиній спільній меті – підвищенню міжкінцевої якості обслуговування за показником продуктивності за рахунок погодженого використання мережних ресурсів багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж, що особливо проявлялося під час збільшення ступеня перекриття зон стійкого прийому, числа радіоінтерфейсів на mesh-станціях і кількості підтримуваних у мережі частотних каналів, що не перекриваються.

5. Уперше запропоновано систему математичних моделей розподілу частотного ресурсу в мережах стандарту IEEE 802.16, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотного ресурсу низхідного каналу зв'язку у вигляді задачі розподілу підканалів із закріпленим числом піднесних у кожному з них, що використовують метод множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів як із фіксованим, так і з масштабованим «вікном» швидкоперетворення Фур'є. Використання запропонованої системи моделей дозволило провести, по-перше, більш повний облік технологічних особливостей стандарту IEEE 802.16 (кількості піднесних у підканалі, кількості підканалів у частотному каналі, схеми модуляції і кодування сигналу) порівняно з відомими рішеннями, заснованими на розподілі піднесних; по-друге, гарантувати необхідну пропускну здатність каналу для кожної зі станцій користувачів шляхом виділення необхідної кількості підканалів; по-третє, провести облік характеристик масштабованого варіанту метода множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів, що виконує вибір необхідної ширини частотного каналу. З метою зниження складності обчислювальної реалізації отриманих рішень запропонований до використання підхід, заснований на відмові від цілочисельності керуючих змінних, що дозволило реалізовувати шуканий розподіл мережних ресурсів у реальному часі без втрати якості кінцевих рішень.

6. Уперше запропоновано модель розподілу частотно-часового ресурсу в мережах стандарту IEEE 802.16, що використовують метод множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів, новизна якого полягає у формулюванні задачі спільного управління частотним ресурсом – підканалами, і часовим ресурсом – слотами. Використання запропонованої моделі дозволило більш повно провести облік виду схеми модуляції і кодування, що використовується станціями користувачів, а також забезпечити підвищення продуктивності безпроводової мережі в цілому, у тому числі за рахунок зменшення обсягу службової інформації, що передається низхідним каналом зв'язку. Крім того, отримала подальший розвиток модель розподілу частотно-часового ресурсу в мережах стандарту IEEE 802.16 в умовах перевантажень, новизна якої полягає в можливості превентивного обмеження пропускну здатності, що виділяється станціям користувачів у низхідному каналі зв'язку, на основі як абсолютних, так і відносних пріоритетів.

7. Уперше запропоновано топологічну модель mesh-мережі стандарту IEEE 802.16, що представлена за допомогою гіперграфів і графів Кьоніга. При цьому можливості гіперграфів використовувались на етапі постановки задачі розподілу частотного ресурсу з метою оцінки характеристик вихідних конфігурацій mesh-мереж, а графи Кьоніга – під час порівняльного аналізу отриманих результатів. Це дозволило більш повно й детально описати можливі конфігурації як усієї mesh-мережі в цілому, так і окремих її елементів, представлених у вигляді вершин і ребер гіперграфу. Також уперше запропоновано функціональну модель розподілу частотного ресурсу в mesh-мережах стандарту IEEE 802.16, новизна якої полягає, по-перше, у формулюванні задачі розподілу частотного ресурсу як задачі розподілу підканалів; по-друге, в обліку можливої

інтерференції між станціями мережі, що дозволило розширити сферу використання запропонованих рішень.

8. Уперше запропоновано систему математичних моделей розподілу частотних і часових ресурсів у мережах технології LTE, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотного ресурсу як задачі розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку для передачі інформації в напрямку станцій користувачів при врахуванні їх технологічних особливостей та існуючих стандартів (схеми модуляції і кодування). Використання запропонованої моделі дозволило, порівняно з відомими рішеннями, гарантувати необхідну пропускну здатність для кожної зі станцій користувачів шляхом виділення необхідної кількості підканалів. Уперше запропоновано модель розподілу частотно-часового ресурсу низхідного каналу зв'язку в мережах технології LTE, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотно-часового ресурсу як задачі розподілу ресурсних блоків між станціями користувачів мережі при врахуванні показників якості обслуговування (необхідної пропускну здатності станцій користувачів), схеми модуляції і кодування, виду розподілу низхідного та висхідного каналів зв'язку (частотний або часовий поділ), службової інформації в низхідному каналі зв'язку безпроводової мережі, що дозволило забезпечити підвищення її продуктивності в цілому шляхом більш ефективного, порівняно з відомими рішеннями, розподілу частотно-часового ресурсу, а також забезпечити виконання вимог станцій користувачів за пропускну здатністю.

9. Удосконалено тензорну модель управління трафіком у безпроводових телекомунікаційних системах із підтримкою якості обслуговування за множиною показників. Новизна моделі полягає, по-перше, у переході до оновленої версії умов збереження потоку, що враховують як можливі втрати пакетів, викликані переповненням буфера черг на маршрутизаторах мережі в умовах реалізації алгоритмів активного управління чергою, так і можливі відмови в обслуговуванні на границі ТКС; по-друге, у тензорній формалізації умов забезпечення якості обслуговування одночасно за множиною різнорідних показників – швидкістю передачі, середньою затримкою та ймовірністю втрат пакетів під час реалізації багатопотокової стратегії маршрутизації, динамічного профілювання трафіка й розподілу пропускну здатності каналів зв'язку між потоками різних класів обслуговування. Це дозволило підвищити адекватність опису ТКС, а також узгодженість рішень щодо управління трафіком із підтримкою якості обслуговування.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості їх безпосереднього використання в сучасних і перспективних безпроводових технологіях (багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11, мережах стандарту IEEE 802.16 і технології LTE) мереж наступного покоління як основи механізмів розподілу мережних ресурсів із забезпеченням QoS, протоколів маршрутизації. Крім того, отримані в роботі результати були використані: під час розробки методів і практичних реалізацій щодо підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління в ході виконання НДР № 261 та НДР № 271-1 (ХНУРЕ); під час побудови та підвищення продуктивності безпроводової ланки телекомунікаційної мережі Вищого навчального закладу Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі»; у телеко-

мунікаційних організаціях (Науково-виробничій організації з обмеженою відповідальністю «СОЛВЕР», Центрі обслуговування мережі в м. Полтава ТОВ «Велтон.Телеком»). Отримані результати також використовувалися в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки, зокрема, у дисципліні «Перспективні безпроводові мережі». Використання результатів підтверджується відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, були отримані автором самостійно й повністю опубліковані у фаховій літературі [1–78]. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто Гаркуші С. В. належать такі наукові результати. У [1] автором проведено аналіз показників ефективності розподілу каналів у багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 із використанням запропонованої моделі за показниками якості обслуговування. У [2] здійснено класифікацію методів розподілу частотних каналів у багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11. У [8] проведено огляд теоретичних і технологічних рішень задач маршрутизації на основі якості обслуговування. У [9] формалізована умова забезпечення необхідного рівня надійності під час передачі трафіка в мережах із різними механізмами відкидання пакетів. У [10] автором запропоновано до використання критерій оптимальності, який сприяє забезпеченню максимальної продуктивності mesh-мережі в цілому й кожного домену колізій окремо під час розв’язання задачі розподілу частотних каналів, що не перекриваються. У [11] розроблена математична модель розподілу частотно-часового ресурсу низхідного каналу зв’язку технології LTE. У [14] запропонована потокова модель маршрутизації з урахуванням втрат пакетів на вузлах телекомунікаційної мережі. У роботі [15] розроблена математична модель розподілу частотно-часового ресурсу низхідного каналу зв’язку технології стандарту IEEE 802.16. У статті [17] запропонована математична модель розподілу ресурсних блоків у низхідному каналі зв’язку технології LTE з метою забезпечення необхідної якості обслуговування користувачів безпроводової мережі. У [18] проведено порівняльний аналіз за ключовими показниками якості обслуговування запропонованого тензорного опису ТКС у ході розв’язання задачі потокової маршрутизації. У [19] запропоновано математичну модель розподілу частотного ресурсу, що представлена у вигляді задачі балансування числа підканалів між mesh-станціями безпроводової мережі стандарту IEEE 802.16. У статті [23] розроблена математична модель розподілу частотного ресурсу в мережу стандарту IEEE 802.16 архітектури point-to-multipoint, сформульована у вигляді задачі балансування числа підканалів низхідного каналу зв’язку між станціями користувачів. У роботі [24] розроблена математична модель розподілу підканалів низхідного каналу зв’язку технології LTE. У статті [27] оновлено умови збереження потоку з урахуванням адаптивного профілювання трафіка в мережі. У [29] запропонований перехід до оновленої версії умов збереження потоку, що враховують можливі втрати пакетів, викликаних переповненням буфера черг на маршрутизаторах мережі.

Апробація основних результатів, отриманих у рамках дисертаційних досліджень, проводилась в ході 45-ти доповідей на 38-ми наукових і науково-

практичних конференціях, форумах і симпозиумах галузевого, державного та міжнародного рівнів [30–74], у тому числі: на науково-практичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 2010); науково-технічних симпозиумах «Нові технології в телекомунікаціях» (Київ, ДУІКТ, 2011, 2012); 11-й та 12-й Міжнародних IEEE конференціях «The Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics» (CADSM) (Поляна-Свялява, НУ «Львівська політехніка», 2011, 2013); 15-му Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харків, ХНУРЕ, 2011); науково-технічних конференціях «Проблеми телекомунікацій» (Київ, ІТС НТУУ «КПІ», 2011, 2014); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Наука и социальные проблемы общества: информатизация и информационные технологии» (Харків, ХНУРЕ, 2011); IX та X Міжнародних наукових конференціях «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ» (Володимир-Суздаль, Російська Федерація, ВДУ ім. А.Г. та Н.Г. Столетових, 2011, 2013); II Міжнародній науково-практичній конференції «Технологии информатизации и управления» (Гродно, Республіка Білорусь, ДУО «ІТІУ» БДУ, 2011); VI Науково-практичному семінарі «Пріоритетні напрями розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення» (Київ, ВІПІ НТУУ «КПІ», 2011); V Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (Київ, ДУІКТ, 2011); 4-й Міжнародній конференції «Телекоммуникационные системы и технологии» (ICSTTN) в рамках Міжнародного радіоелектронного форуму «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харків, АН-ПРЕ, ХНУРЕ, 2011); науково-методичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка спеціалістів у галузі телекомунікацій» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 2011, 2012, 2013); XI та XII Міжнародних IEEE конференціях «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET)» (Львів-Славське, НУ «Львівська політехніка», 2012, 2014); 22-й та 23-й Міжнародних IEEE конференціях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо)» (Севастополь, СевНТУ, 2012, 2013); восьмій і дев'ятій наукових конференціях «Іноваційні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012, 2013); II Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, ЧНУ, 2012); VIII та IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO)» (Лівадія, ДУІКТ, 2012, 2013); XXXIII та XXXIV Міжнародних наукових IEEE конференціях «Electronics and Nanotechnology (ELNANO)» (Київ, НТУУ «КПІ», 2013, 2014); IV-му науково-практичному форумі «Січневі ПС: інтелектуальна оборона» (Львів, АСВ ім. гетьмана П. Сагайдачного, 2013); II Міжнародній науково-технічній і науково-методичній конференції «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Російська Федерація, СПбГУТ, 2013); Міжнародній Сибірській IEEE конференції «Control and Communications (SIBCON)» (Красноярськ, Російська Федерація, 2013); першій Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми інфокомунікацій.

Наука и технологии» (Харків, ХНУРЕ, 2013); IX Міжнародній IEEE конференції «Antenna Theory and Techniques (ICATT)» (Одеса, ОНАЗ, 2013); третій Міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (Одеса, ОНАЗ, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC)» (Москва, МДТУ МІРЕА, 2013); 68-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, вчених, аспірантів та студентів (Одеса, ОНАЗ, 2013); Світовому телекомунікаційному конгресі «World Telecommunications Congress 2014 (WTC 2014)» (Берлін, Німецьке представництво «AG Telekom», 2014).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 78 наукових працях, із яких 31 виконані без співавторства. Серед праць – 29 статей, із яких: 19 статей – у наукових журналах і збірниках наукових праць, включених до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора й кандидата наук; 8 статей – у наукових журналах і збірниках праць Російської Федерації; одна стаття – у журналі, що публікується на території США; одна стаття – у журналі, що публікується в Республіці Грузія. Одна стаття викладена в науко-метричній базі Scopus, а 13 – статей у науково-метричних базах e-library та Scopus. Матеріали дисертації опубліковані в 45-ти доповідях на 38-ми науково-практичних конференціях, форумах і симпозіумах галузевого, державного та міжнародного рівнів, із яких 38 доповідей представлені на конференціях, що проходили на території України, 5 – у Російській Федерації, 1 – у Республіці Білорусь, 1 – у Німеччині. 18 доповідей представлені на конференціях, що проходили під егідою IEEE, вони викладені в базах IEEEExplore і Scopus. Отримано один патент на винахід і три патенти на корисну модель. Зазначені публікації повністю відображають наукові результати й висновки дисертаційної роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів і п'яти додатків. Загальний обсяг роботи становить 482 сторінки, із них 315 сторінок основного тексту, 101 сторінка з рисунками та таблицями, 26 сторінок додатків. Список використаних джерел містить 338 найменувань, викладених на 40 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито зміст і стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами й темами, сформульована мета та завдання дослідження, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку безпроводових ТКС та основних вимог, що до них висуваються. У результаті аналізу виявлено, що найбільшу ефективність у підвищенні продуктивності забезпечує оптимальне управління мережними ресурсами, до яких слід віднести: частотні, часові, інформаційні, буферні, обчислювальні ресурси, а також трафік. Ураховуючи значні відмінності між зазначеними видами мережних ресурсів,

принципи управління ними можуть істотно відрізнятися. Установлено, що вдосконалення управління мережними ресурсами може проводитися на трьох рівнях: технологічному рівні, рівні метода і рівні моделі. При цьому важливим джерелом удосконалення процесу управління (розподілу) мережними ресурсами є перегляд математичних моделей та методів, які можуть бути покладені в основу відповідних протоколів. Це й визначило необхідність удосконалення (модернізації) безпроводових телекомунікаційних систем за новими технологічними, теоретичними і методологічними принципами, основаними на використанні математичного апарату гіперграфів і тензорного аналізу.

У **другому розділі** запропоновано топологічну модель багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Network, MR MC WMN) стандарту IEEE 802.11, яка дозволила більш повно й детально описати можливі конфігурації як усієї mesh-мережі загалом, так і окремих її елементів, представлених у вигляді вершин і ребер гіперграфу. Математичний апарат гіперграфів використаний на етапі постановки задачі розподілу частотних каналів (ЧК), що не перекриваються, з метою оцінки характеристик вихідних конфігурацій mesh-мереж (під час формування та опису зон стійкого прийому), а також у ході формалізації результатів її розв'язання. На етапі постановки задачі розподілу ЧК, що не перекриваються, MR MC WMN була представлена у вигляді гіперграфу $H = (I, J; R)$, де множина $I = \{n_i / i = \overline{1, N}\}$ вершин модулює mesh-станції, множина $J = \{z_j / j = \overline{1, Z}\}$ ребер – зони стійкого прийому (Transmission Range, TR), а предикат R , будучи інцидентором гіперграфу H , визначає, чи належить i -а mesh-станція j -й зоні стійкого прийому. Загальна кількість mesh-станцій у мережі визначається параметром N , а зон стійкого прийому – параметром Z . Так, якщо i -а mesh-станція бере участь у формуванні j -ї зони стійкого прийому, то $R(n_i, z_j)$ – дійсний, тобто рівний одиниці, у протилежному випадку $R(n_i, z_j)$ – хибний, тобто дорівнює нулю.

Результатом розв'язання задачі розподілу ЧК є розрахунок булевої змінної:

$$x_{n_i, k_t} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й mesh-станції виділений } t\text{-й ЧК;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad (1)$$

відповідно до якої виконується формування доменів колізій станціями однієї TR, що використовують спільний частотний канал (рис. 1). Тому кожній окремо взятій станції $n_i \in I$ поставлена у відповідність вершина, а кожному домену колізій $d_u \in U$ – ребро гіперграфу $G(I, U; Q)$ (рис. 2). У результаті цього використання i -ї станції при формуванні u -го домена колізій визначається предикатом $Q(n_i, d_u)$.

З метою підвищення продуктивності MR MC WMN стандарту IEEE 802.11, а також розширення сфери їх застосування, удосконалено функціональну модель розподілу ЧК, що не перекриваються. Запропонована модель, на відміну від раніше відомих рішень, дозволяє забезпечити високу узгодженість під час розв'язання класу задач розподілу ЧК шляхом розрахунку керуючої змінної (1) за рахунок виконання таких умов:

- 1) Умова включення i -ї mesh-станції в мережу:

$$\sum_{t=1}^K x_{n_i, k_t} \geq m_{n_i}^*, (i = \overline{1, N}), \quad (2)$$

де $1 \leq m_{n_i}^* \leq m_{n_i}$; $\sum_{t=1}^K x_{n_i, k_t}$ – кількість ЧК, закріплених за радіоінтерфейсами (PI) однієї mesh-станції; K – кількість ЧК, що не перекриваються.

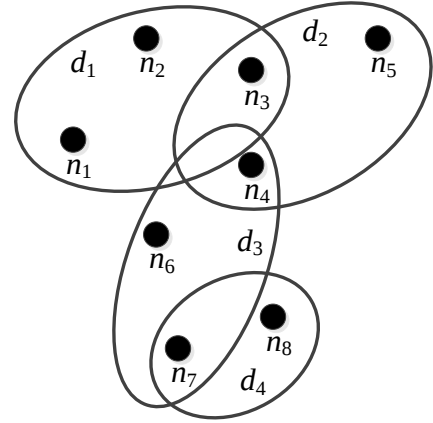
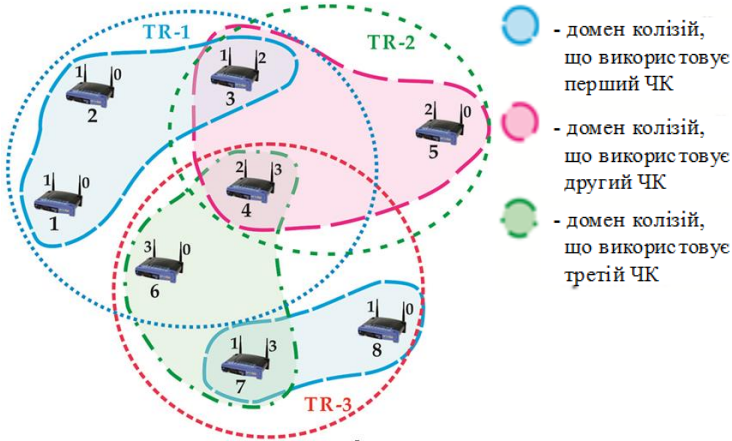


Рис. 1. Приклад розв'язання задачі розподілу трьох ЧК, що не перекриваються

Рис. 2. Гіперграфове представлення розв'язку задачі розподілу ЧК

2) Умова виділення i -й mesh-станції кількості ЧК, що не перевищує кількості її радіоінтерфейсів:

$$\sum_{t=1}^K x_{n_i, k_t} \leq m_{n_i}, (i = \overline{1, N}). \quad (3)$$

3) Умова роботи двох mesh-станцій одна з одною (в рамках однієї TR) не більше ніж на одному ЧК:

$$\sum_{t=1}^K (x_{n_i, k_t} x_{n_s, k_t}) \leq 1, (i, s = \overline{1, N}; R(n_i, z_j) = R(n_s, z_j) = 1; j = \overline{1, Z}). \quad (4)$$

4) Умова того, що довільна mesh-станція на ЧК, який вона використовує, працює хоча б з однією mesh-станцією своєї TR:

$$x_{n_i, k_t} \leq \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^N x_{n_s, k_t}, (R(n_i, z_j) = R(n_s, z_j) = 1; j = \overline{1, Z}; t = \overline{1, K}), \quad (5)$$

де $\sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^N x_{n_s, k_t}$ – число mesh-станцій у j -й TR (без урахування mesh-станції, що аналізується), які працюють на t -му ЧК.

5) Умова зв'язності mesh-мережі (доменів колізій) в кожній TR:

$$\sum_{t=1}^K \sum_{i=1}^N x_{n_i, k_t} \geq N_H(z_j) + K - 1 - b, (j = \overline{1, Z}; R(n_i, z_j) = 1), \quad (6)$$

де $b = \begin{cases} K - N, \text{ якщо } K > \text{INT}\left(\left[\sum_{n_i=1}^N m_{n_i}\right] / 2\right); \\ 0, \text{ у протилежно му випадку;} \end{cases}$ $\text{INT}\left(\left[\sum_{i=1}^N m_{n_i}\right] / 2\right)$ – максимальне

число ЧК, що не перекриваються та можуть бути ввімкнені на РІ станцій mesh-мережі; $N_H(z_j)$ – кількість станцій, що бере участь у формуванні j -ї TR.

6) Умова відсутності ефекту «прихованої станції»:

$$a_{z_j, n_i} a_{z_q, n_i} x_{n_i, k_t} \sum_{\substack{R(n_s, z_q)=1 \\ R(n_s, z_j)=0}} x_{n_s, k_t} \sum_{\substack{R(n_r, z_q)=1 \\ R(n_r, z_j)=0}} x_{n_r, k_t} = 0, \quad (7)$$

за умови, що $i = \overline{1, N}$; $t = \overline{1, K}$; $j, q = \overline{1, Z}$; $j \neq q$; $i \neq s \neq r$, де a_{z_j, n_i} і a_{z_q, n_i} – елементи матриці зон стійкого прийому.

7) Умова роботи однієї із множини mesh-станцій, що знаходяться на перетині зон стійкого прийому та використовують не менше двох ЧК, із mesh-станціями різних TR:

$$\begin{cases} a_{z_j, n_i} a_{z_q, n_i} x_{n_i, k_t} x_{n_i, k_h} \left(\sum_{s=1}^N (a_{z_j, n_s} x_{n_s, k_t}) + \sum_{s=1}^N (a_{z_j, n_s} x_{n_s, k_h}) \right) \times \\ \times \left(\sum_{r=1}^N (a_{z_q, n_r} x_{n_r, k_t}) + \sum_{r=1}^N (a_{z_q, n_r} x_{n_r, k_h}) \right) > 0; \\ a_{z_j, n_s} a_{z_q, n_s} = 0; \\ a_{z_j, n_r} a_{z_q, n_r} = 0; \end{cases} \quad (8)$$

за умови, що $t, h = \overline{1, K}$; $t \neq h$; $j \neq q$; $i \neq s \neq r$.

8) Умова роботи хоча б однієї із множини mesh-станцій, що знаходяться на перетині кількох зон стійкого прийому, більше ніж на одному ЧК:

$$\sum_{t=1}^K \sum_{i=1}^N (a_{z_j, n_i} a_{z_q, n_i} x_{n_i, k_t}) > \sum_{i=1}^N (a_{z_j, n_i} a_{z_q, n_i}) + 1, \quad (j, q = \overline{1, Z}; j \neq q), \quad (9)$$

де $\sum_{t=1}^K \sum_{i=1}^N (a_{z_j, n_i} a_{z_q, n_i} x_{n_i, k_t})$ – кількість включених РІ на mesh-станціях, які знахо-

дяться на перетині j -ї та q -ї TR; $\sum_{i=1}^N (a_{z_j, n_i} a_{z_q, n_i})$ – число mesh-станцій, що знаходяться на перетині j -ї та q -ї TR.

Отже, новизна моделі полягає, по-перше, у її двоіндексному характері, що дозволило в 2-3 рази знизити розмірність задачі, у порівнянні з існуючою трьохіндексною математичною моделлю, і підвищити, тим самим, масштабованість кінцевих рішень. Крім того, у моделі отримано умови зв'язності mesh-станцій, доменів колізій та мережі в цілому (6)–(9), що особливо важливо в умовах високого ступеня перекриття зон стійкого прийому. Умова зв'язності справедлива для випадку використання трьох і більше частотних каналів, які не перекриваються, що розширило сферу застосування запропонованих рішень.

У рамках двохіндексної моделі (1)–(9) запропоновано критерій оптимальності розв’язання задачі розподілу ЧК, який представлений квадратичною формою від числа станцій, що формують домени колізій у рамках тієї або іншої TR:

$$\min \sum_{j=1}^Z \sum_{t=1}^K \left[\sum_{n=1}^N x_{n_i, k_t} a_{n_i, z_j} \right]^2. \quad (10)$$

Використання запропонованого критерію оптимальності (10) дозволило забезпечити більш ефективне використання (балансування) мережних ресурсів, числа mesh-станцій у доменах колізій, а також підвищити продуктивність мережі та якість обслуговування загалом.

З метою збільшення масштабованості рішень щодо розподілу ЧК у MR MC WMN удосконалено двохіндексну математичну модель шляхом її декомпозиційного представлення, у рамках якої для розв’язання задачі розподілу частотних каналів як шуканий виступав наступний вектор:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{x}_{z_1} \\ \vdots \\ \vec{x}_{z_j} \\ \vdots \\ \vec{x}_{z_Z} \end{bmatrix} \quad \text{при} \quad \vec{x}_{z_j} = \begin{bmatrix} \vec{x}'_{z_j} \\ \vec{x}''_{z_j} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де $\vec{x}_{z_j}$ – вектор, що характеризує порядок розподілу ЧК у j -й зоні стійкого прийому; $\vec{x}'_{z_j}$ – вектор розподілу ЧК між PI mesh-станцій, що знаходяться тільки в цій z -й TR; $\vec{x}''_{z_j}$ – вектор розподілу ЧК між PI mesh-станцій, що знаходяться, крім j -ї TR, одночасно ще й в інших (іншій) TR.

Удосконалення моделі полягало в її доповненні умовами ідентичного управління станціями, що перебувають одночасно в декількох TR, а також зв’язності доменів колізій:

$$\vec{x}''_{z_j} = \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq j}}^Z C_{z_j z_y} \vec{x}''_{z_y}, \quad j = \overline{1, Z}; \quad (12) \quad -E_{z_j}^T \vec{x}_{z_j} \leq \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_{z_r}^T \vec{x}_{z_r} - N_H(z_j) - K + 1 + b. \quad (13)$$

Декомпозиційна модель забезпечила відносну незалежність під час розв’язання задачі розподілу частотних каналів за окремими зонами стійкого прийому, що прямо пов’язано з масштабованістю отриманих рішень.

На основі декомпозиційної моделі запропоновано ієрархічно-координаційний метод розподілу ЧК, що не перекриваються, у MR MC WMN IEEE 802.11, новизна якого полягає у введенні дворівневої ієрархії mesh-станцій на основі принципу прогнозування взаємодій, що дозволило значно знизити розмірність задачі нижнього рівня (рівня mesh-станцій) без істотного навантаження координаторів верхнього рівня. З метою розв’язання задачі з розподілу ЧК відповідно до принципу прогнозування взаємодій виконано перехід до двоїстої задачі з максимізації лагранжиану:

$$\min_x F = \max_{\lambda, \mu} L, \quad (14)$$

де $\vec{\lambda}$ і $\vec{\mu}$ – вектори множників Лагранжа.

Для фіксованих множників Лагранжа ($\vec{\lambda}^*$ і $\vec{\mu}^*$), які розраховуються на рівні TR-координаторів, лагранжиан було представлено у вигляді:

$$L = \sum_{j=1}^Z L_{z_j}, \quad (15)$$

$$L_{z_j} = \sum_{t=1}^K \left[\sum_{i=1}^N x_{n_i, k_t} a_{n_i, z_j} \right]^2 + \vec{\lambda}_{z_j}^{*T} \vec{x}_{z_j}'' - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq j}}^Z \left[\vec{\lambda}_{z_y}^{*T} C_{z_y z_j} \right] \vec{x}_{z_j}'' + \\ + \vec{\mu}_{z_j}^{*T} \left[-E_{z_j}^T \vec{x}_{z_j}^* + N_H(z_j) + K - 1 - b \right] - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq j}}^Z \mu_{z_j}^{*T} \left[E_{z_r}^T \vec{x}_{z_r} \right]. \quad (16)$$

Відповідно до принципу прогнозування взаємодій як координуючі змінні мережі виступали вектори множників Лагранжа $\vec{\lambda}$ і $\vec{\mu}$, а також вектор $\vec{x}_{z_j}''$, які розраховуються на верхньому рівні ієрархії (рівні координатора мережі) за фіксованих значень векторної змінної $\vec{x}_{z_j}'$, що розраховується на рівні TR-координаторів.

Отже, відповідно до проведених перетворень задача оптимального розподілу частотних каналів у MR MC WMN у цілому виявилась декомпозиційованою на Z підзадач, кожна з яких може розв'язуватись TR-координаторами різних зон стійкого прийому незалежно одна від одної.

Використання запропонованих моделі та методу, з технологічної точки зору, сприяло зниженню інерційності управління та обсягів циркулюючої в мережі інформації про її стан, яку необхідно постійно оновлювати в ході оптимізації розподілу ЧК, а в підсумку свідчило про підвищення масштабованості одержуваних у роботі рішень. У ході аналізу ієрархічно-координаційного методу спостерігалось зниження кількості ітерацій при збіжності задачі розподілу частотних каналів, що не перекриваються, в 1,2–1,7 рази при зменшенні ступеня перекриття TR та загальної кількості станцій у них.

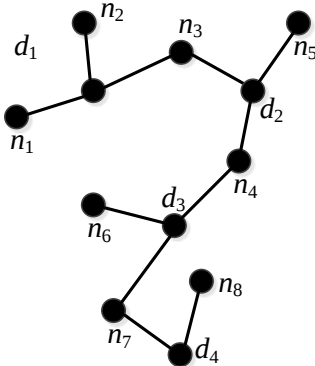


Рис. 3. Плоске кьонігове представлення розв'язку задачі розподілу ЧК

Отримала подальший розвиток математична модель потокової маршрутизації в MR MC WMN стандарту IEEE 802.11. Новизна моделі полягає в тому, що для адекватної формалізації процесів потокової маршрутизації використовувалося плоске кьонігове представлення MR MC WMN, структура яких описувалася гіперграфами. Для розв'язання задачі маршрутизації трафіка в MC MR WMN гіперграфу $G(I, U; Q)$, що моделює mesh-мережу у вигляді доменів колізій (рис. 2), було віднесено граф Кьоніга $K(G) = (I, U; Q)$ із множиною вершин $I \cup U$ (рис. 3).

У рамках запропонованої потокової моделі маршрутизації як маршрутні змінні виступали

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_{n_i, d_u}^v \\ \text{---} \\ x_{d_u, n_i}^v \end{bmatrix}, \quad (17)$$

де x_{n_i, d_u}^v – частка інтенсивності v -го потоку, що передається від i -ї mesh-станції станціям u -го домену колізій; x_{d_u, n_i}^v – частка інтенсивності v -го потоку, що передається до i -ї mesh-станції станціями u -го домену колізій.

Використання кьонігового представлення дозволило на основі більш повного обліку особливостей побудови MR MC WMN формалізувати умови збереження потоку як в окремих станціях, так і в усіх доменах колізій, на які декомпозиціювалась вихідна mesh-мережа після розв'язання задачі розподілу частотних каналів, що не перекриваються:

$$\begin{cases} \sum_{u: Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v = 1, \quad v \in V, \quad n_i = s_v; \\ \sum_{u: Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v - \sum_{u: Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v = 0, \quad v \in V, \quad n_i \neq s_v, p_v; \\ \sum_{i: Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v - \sum_{i: Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v = 0, \quad v \in V; \\ \sum_{u: Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v = 1, \quad v \in V, \quad n_i = p_v, \end{cases} \quad (18)$$

де V – множина потоків у WMN; s_v – станція-відправник; p_v – станція-отримувач для пакетів v -го потоку.

На керуючі змінні також накладались такі обмеження:

$$0 \leq x_{n_i, d_u}^v \leq 1; \quad (19)$$

$$0 \leq x_{d_u, n_i}^v \leq 1; \quad (20)$$

$$x_{n_i, d_u}^v \in \{0, 1\}; \quad (21)$$

$$x_{d_u, n_i}^v \in \{0, 1\}. \quad (22)$$

У разі використання обмежень (19)–(20) задача класифікується як задача багатопляхової маршрутизації, а (21)–(22) – одношляхової маршрутизації.

Умови-обмеження, що відповідають за запобігання перевищення поточних значень доступної швидкості передачі, мають вигляд:

$$\sum_{v=1}^V r^v x_{n_i, d_u}^v \leq c_{n_i, d_u}, \quad (23)$$

$$\sum_{v=1}^V r^v x_{d_u, n_i}^v \leq c_{d_u, n_i}, \quad (24)$$

де $i = \overline{1, N}$; $u = \overline{1, D}$; c_{n_i, d_u} – максимальна швидкість передачі i -ї mesh-станції станціям u -го домену колізій; c_{d_u, n_i} – максимальна швидкість передачі до i -ї mesh-станції від станцій u -го домену колізій; r^v – середня швидкість v -го потоку, що надходить в mesh-мережу на обслуговування.

Визначення метричних особливостей елементів мережі, в якості яких у MR MC WMN нерідко можуть виступати пропускні здатності доменів колізій, у рамках запропонованої моделі виконувалось відповідно до протоколу множинного доступу з контролем несної й униканням колізій (Carrier Sense Multiple

Access With Collision Avoidance, CSMA/CA). У рамках протоколу CSMA/CA доступ до середовища передачі одного домену колізій WMN надається в будь-який момент часу тільки для однієї mesh-станції. Отже, розрахунок метричних показників здійснювався відповідно до умов функціонування мережі, а саме: 1) коли всі станції намагаються виконувати передачу даних; 2) під час врахування наявності потоків, що передаються через mesh-станцію; 3) під час врахування інтенсивностей потоків, що передаються через mesh-станцію.

У ході розв'язання задачі маршрутизації в MR MC WMN стандарту IEEE 802.11 як критерій оптимальності виступала наступна умова:

$$\min_x \sum_{v=1}^V r^v \left(\sum_{u: Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v + \sum_{i: Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v \right), \quad (25)$$

виконання якого забезпечує мінімізацію завантаженості елементів (станцій і доменів) і MR MC WMN загалом.

Також запропоновано модель узгодженого розв'язання задач розподілу ЧК, що не перекриваються, і потокової маршрутизації в MR MC WMN стандарту IEEE 802.11 із використанням гіперграфів і графів Кьоніга. Якщо в наведених раніше розв'язках задача розподілу ЧК, що не перекриваються, була орієнтована на отримання зв'язної збалансованої за пропускну здатністю структури WMN, то в рамках запропонованої моделі розв'язання зазначених задач підпорядковане єдиній спільній меті – підвищенню міжкінцевої якості обслуговування за показниками продуктивності за рахунок узгодженого використання мережних ресурсів MR MC WMN, що особливо проявлялося під час збільшення ступеня перекриття TR, числа радіоінтерфейсів на mesh-станціях і кількості підтримуваних частотних каналів, що не перекриваються, у мережі.

Для забезпечення узгодженого розв'язання задач розподілу ЧК, що не перекриваються (1)-(10), та потокової маршрутизації (17)–(25) в якості шуканого вектора керуючих змінних виступала форма

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_{n_i, k_t} \\ x_{n_i, k_t}^v \\ x_{k_t, n_i}^v \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Для розрахунку шуканих змінних x_{n_i, k_t} необхідно забезпечити виконання умов обмежень, які відповідають за розподіл ЧК, що не перекриваються. З огляду на те, що за узгодженого розв'язання задач розподілу ЧК і потокової маршрутизації в якості вихідних даних виступає mesh-мережа, що складається із множини станцій і зон стійкого прийому, що ними формуються, то як маршрутні змінні виступають такі: x_{n_i, k_t}^v – змінна, що характеризує частку інтенсивності v -го потоку пакетів, який передається i -ю mesh-станцією, станціям, що працюють на t -му ЧК у рамках однієї TR; x_{k_t, n_i}^v – змінна, що характеризує частку інтенсивності v -го потоку пакетів, який передається до i -ї mesh-станції від інших станцій, що

працюють на t -му ЧК у рамках однієї TR. Відповідно до шуканих змінних (26) умови збереження потоку (18) мають вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^K \sum_{j=1}^Z x_{n_i, k_t}^v a_{z_j, n_i} = 1, & v \in V, n_i = s_v; \\ \sum_{t=1}^K \sum_{j=1}^Z x_{n_i, k_t}^v a_{z_j, n_i} - \sum_{t=1}^K \sum_{j=1}^Z x_{k_t, n_i}^v a_{z_j, n_i} = 0, & v \in V, n_i \neq s_v, d_v; \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^Z x_{k_t, n_i}^v a_{z_j, n_i} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^Z x_{n_i, k_t}^v a_{z_j, n_i} = 0, & v \in V; \\ \sum_{t=1}^K \sum_{j=1}^Z x_{k_t, n_i}^v a_{z_j, n_i} = 1, & v \in V, n_i = d_v. \end{cases} \quad (27)$$

За аналогією з виразами (19)–(22) на керуючі змінні можуть бути накладені додаткові обмеження:

$$0 \leq x_{n_i, k_t}^v \leq 1; \quad (28) \quad 0 \leq x_{k_t, n_i}^v \leq 1; \quad (29)$$

$$x_{n_i, k_t}^v \in \{0, 1\}; \quad (30) \quad x_{k_t, n_i}^v \in \{0, 1\}. \quad (31)$$

Наведені обмеження визначають задачу багатошляхової (28)–(29), або одношляхової (30)–(31) маршрутизації.

Умови-обмеження (23) та (24), що відповідають за запобігання перевищення поточних значень доступної швидкості передачі, мають вигляд:

$$\sum_{v=1}^V r^v x_{n_i, k_t}^v \leq c_{n_i, k_t}; \quad (32) \quad \sum_{v=1}^V r^v x_{k_t, n_i}^v \leq c_{k_t, n_i} \quad (33)$$

за $i = \overline{1, N}$; $t = \overline{1, K}$.

У рамках моделі узгодженого розв'язання задач розподілу ЧК, що не перекриваються, і потокової маршрутизації проведено мінімізацію кількості станцій, що входять до складу кожного з доменів колізій, а також завантаженості MR MC WMN під час врахування пріоритету потоку:

$$\begin{aligned} & \min_X \left(\sum_{j=1}^Z \sum_{t=1}^K \left[\sum_{i=1}^N g_{n_i, k_t} x_{n_i, k_t}^v a_{n_i, z_j} \right]^2 + \right. \\ & \left. + \sum_{v=1}^V r^v \left[\sum_{t=1}^K \sum_{j=1}^Z g_{n_i, k_t}^v x_{n_i, k_t}^v a_{z_j, n_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^Z g_{k_t, n_i}^v x_{k_t, n_i}^v a_{z_j, n_i} \right] \right), \end{aligned} \quad (34)$$

де g_{n_i, k_t} – величина питомого штрафу за формування доменів колізій великих розмірів; g_{n_i, k_t}^v , g_{k_t, n_i}^v – величина питомого штрафу за завантаження i -ї mesh-станції на t -му частотному каналі.

У результаті порівняльного аналізу послідовного та запропонованого узгодженого розв'язання задач розподілу частотних каналів, що не перекриваються, і потокової маршрутизації встановлено, що узгоджене розв'язання зазначених задач із використанням запропонованої моделі (1)–(10), (26)–(34) дозволяє на 75-100% збільшити продуктивність MR MC WMN.

У **третьому розділі** запропоновано систему математичних моделей розподілу частотного ресурсу в мережах стандарту IEEE 802.16, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотного ресурсу низхідного каналу зв'язку у вигляді задачі розподілу підканалів із закріпленням числом піднесних у кожному з них, що використовують метод множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів як із фіксованим, так і з масштабованим «вікном» швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

У випадку використання масштабованого «вікна» ШПФ визначення ширини частотного каналу виконується відповідно до коефіцієнта масштабування K , який відповідає кількості підканалів у низхідному каналі зв'язку:

$$K = \min \{s \in L | s \geq H\}, \quad (35)$$

де $k = \overline{1, K}$; L – множина можливих значень числа підканалів залежно від шири-

ни частотного каналу; $H = \sum_{n=1}^N \left\lceil \frac{R_{необ}^n}{R^{n,k}} \right\rceil$ – загальна кількість підканалів, необхід-

на для виконання вимог із пропускної здатності ($R_{необ}^n$) для всіх станцій користувачів (Subscriber Station, SS); N – загальна кількість SS у мережі; $R^{n,k}$ – пропускна здатність k -го підканалу, виділена для n -ї SS залежно від обраної схеми модуляції і кодування сигналу (Modulation and Coding Scheme, MCS).

У ході розв'язання задачі розподілу підканалів у рамках запропонованої моделі станціям користувачів мережі виконувався розрахунок булевої керуючої змінної:

$$x_n^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } k\text{-й підканал виділений } n\text{-й SS;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (36)$$

Результатом розрахунку змінних (36) є закріплення підканалів за станціями користувачів у низхідному каналі зв'язку. Під час розрахунку шуканих змінних x_n^k необхідно виконати ряд важливих умов-обмежень:

1) Умова закріплення k -го підканалу не більше ніж за однією SS:

$$\sum_{n=1}^N x_n^k \leq 1, \quad (k = \overline{1, L}). \quad (37)$$

2) Умова виділення n -ї SS необхідної пропускної здатності:

$$R^{n,k} \sum_{k=1}^K x_n^k \geq R_{необ}^n \delta_n, \quad (38)$$

де $\delta_n = \begin{cases} 1, & \text{якщо для } n\text{-ї SS потрібно гарантувати необхідну пропускну здатність;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases}$

3) Умова балансування пропускної здатності, що виділяється SS відносно необхідних значень:

$$\frac{R^{n,k} \sum_{k=1}^K x_n^k}{R_{необ}^n} \geq \beta, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (39)$$

$$\frac{R^{n,k} \sum_{k=1}^K x_n^k}{R_{необ}^n} = \gamma_n - \text{відношення пропускної здатності, виділеної } n\text{-й SS, до необхід-}$$

ної пропускної здатності ($R_{необ}^n$); β – нижній динамічно керуємий для γ_n .

У рамках запропонованої системи моделей розподіл підканалів між станціями користувачів виконується збалансовано щодо їх вимог до пропускної здатності відповідно до критерію оптимальності

$$\max \beta. \quad (40)$$

Використання запропонованої системи моделей дозволило провести, по-перше, більш повний облік технологічних особливостей стандарту IEEE 802.16 (кількості піднесних у підканалі, кількості підканалів у частотному каналі, схеми модуляції та кодування сигналу) порівняно з відомими рішеннями, заснованими на розподілі піднесних; по-друге, виділити необхідну пропускну здатність тим станціям користувачів, яким забезпечуються гарантії, а для інших забезпечити її збалансований розподіл; по-третє, провести облік характеристик масштабованого варіанта методу множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів, що проводить вибір необхідної ширини частотного каналу.

З метою зниження складності обчислювальної реалізації розроблених рішень запропоновано до використання підхід, заснований на відмові від цілочисельності керуючих змінних (36), що дозволило реалізувати шуканий розподіл мережних ресурсів у реальному часі без втрати якості кінцевих рішень у такому вигляді:

$$0 \leq x_n^k \leq 1, \quad (n = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}). \quad (41)$$

З метою збереження фізичного змісту моделі (36)-(40), до неї введені додаткові обмеження на керуючі змінні:

$$\sum_{k=1}^K x_n^k x_s^k = 0, \quad (n, s = \overline{1, N}, n \neq s). \quad (42) \quad \sum_{n=1}^N x_n^k = 1, \quad (k = \overline{1, K}), \quad (43)$$

Використання виразу (42) дозволяє гарантувати, що k -й підканал буде закріплений не більше ніж за однією SS. Виконання обмеження (43), сумісно з (41), дозволяє гарантувати, що k -й підканал буде закріплений лише за однією SS.

Застосування вдосконаленої моделі за рахунок реалізованої відмови від цілочисельності керуючої змінної дозволило спростити пошук оптимального рішення і сприяло реалізації задачі розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку на практиці в реальному масштабі часу без втрати адекватності опису. Відзначено, що сформульована задача з розподілу підканалів низхідного каналу з точки зору фізики процесів, що протікають у безпроводовій мережі, належить до класу задач балансування частотних ресурсів – числа підканалів, що виділяються для станцій користувачів, а з математичної точки зору – це вже задача нелінійного програмування.

У результаті порівняльного аналізу відомих методів і запропонованих рішень встановлено, що використання математичної моделі (37)–(43) розподілу підканалів у низхідному каналі зв'язку дозволяє на 10–35 % підвищити імовір-

ність виділення станціям користувачів необхідної пропускної здатності (модель 2 на рис. 4), за рахунок підвищення ступеня балансування пропускної здатності між станціями користувачів на 10 % (модель 2 на рис. 5). Крім того, використання моделі (37)–(43) дозволяє в середньому в 1,4 рази підвищити загальну продуктивність низхідного каналу зв'язку.

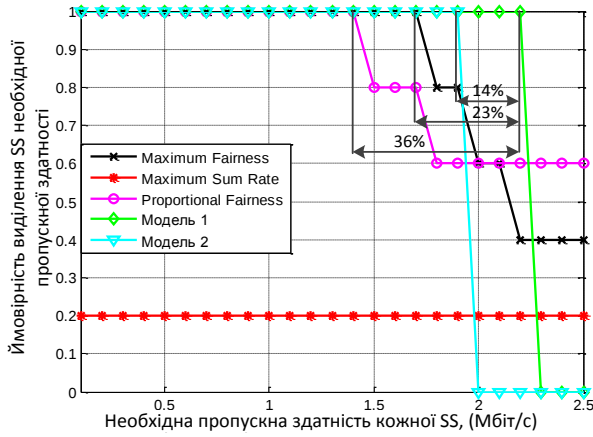


Рис. 4. Результати порівняльного аналізу імовірності виділення SS необхідної пропускної здатності

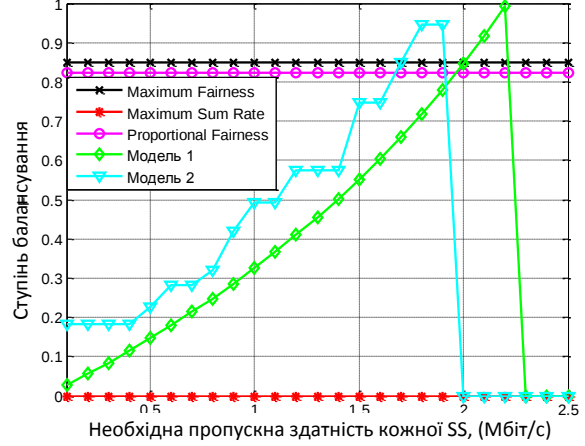


Рис. 5. Результати порівняльного аналізу ступеня балансування пропускної здатності SS

Запропоновано модель розподілу частотно-часового ресурсу в мережах стандарту IEEE 802.16, що використовують метод множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів, новизна якої полягає у формулюванні задачі спільного управління частотним ресурсом – підканалами, і часовим ресурсом – слотами. У ході розв'язання задачі розподілу підканалів і слотів у низхідному каналі зв'язку необхідно забезпечити розрахунок булевої керуючої змінної, що визначає порядок розподілу частотно-часового ресурсу:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m\text{-й слот на } k\text{-му підканалі виділений } n\text{-й SS;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad (44)$$

де $m = \overline{1, M}$; M – кількість слотів у низхідному каналі зв'язку.

Розрахунок шуканих змінних $x_{k,m}^n$ виконувався відповідно до таких умов обмежень:

1) Умова закріплення k -го підканалу протягом передачі m -го слота не більше ніж за однією SS

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1, \quad (k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}). \quad (45)$$

2) Умова закріплення за n -ю SS кількості слотів, що забезпечує необхідну пропускну здатність у рамках обраної MCS:

$$R_S^n \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{k,m}^n \geq R_{необ}^n, \quad (n = \overline{1, N}), \quad (46)$$

де R_S^n – пропускна здатність слота, що закріплений за n -ю SS.

3) Умова формування одного пакета даних для n -ї SS задля зменшення кількості службової інформації, що передається в кадрі:

$$x_{k,i}^n x_{k,z}^n (i - z + 1) - \sum_{u=z}^i x_{k,u}^n \leq 0, \quad (z = \overline{1, M-1}; i = \overline{2, M}; n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; i > z); \quad (47)$$

$$x_{j,m}^n x_{r,m}^n (j - r + 1) - \sum_{s=r}^j x_{s,m}^n \leq 0, \quad (r = \overline{1, K-1}; j = \overline{2, K}; n = \overline{1, N}; m = \overline{1, M}; j > r). \quad (48)$$

4) Умова формування пакетів даних «прямокутної форми», що відповідає вимогам стандарту IEEE 802.16:

$$x_{k,m}^n \sum_{d=1}^M x_{k,d}^n \sum_{b=1}^K x_{b,m}^n = x_{k,m}^n \sum_{g=1}^K \sum_{h=1}^M x_{g,h}^n, \quad (n = \overline{1, N}; k = \overline{1, K}; m = \overline{1, M}). \quad (49)$$

5) Умови резервування необхідної кількості слотів для передачі службової інформації, що формується в кадрі відповідно до технологічних особливостей низхідного каналу зв'язку стандарту IEEE 802.16:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n = 0, \quad (m = \overline{1, m_{\text{служ}} - 1}, \lceil Q/K \rceil \geq 1); \quad (50)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k, m_{\text{служ}}}^n = 0, \quad (k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil \geq 1); \quad (51)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{k,1}^n = 0, \quad (k = \overline{1, k_{\text{служ}}}, \lceil Q/K \rceil < 1), \quad (52)$$

де $m_{\text{служ}} = \lceil Q/K \rceil$ – кількість слотів, виділених для передачі службової інформації, що займають усю ширину частотного каналу (розміщуються на початку кадру після преамбули); $k_{\text{служ}} = Q - K(m_{\text{служ}} - 1)$ – кількість слотів, що виділені для передачі службової інформації та займають лише частину ширини каналу.

Умови (50) та (51) використовуються у випадку, якщо кількість слотів, необхідна для передачі службової інформації, перевищує або рівна числу підканалів у частотному каналі $\lceil Q/K \rceil \geq 1$. Також умова (50) дозволяє провести резервування всіх підканалів протягом часу передачі кількості слотів рівної $m_{\text{служ}}$, для передачі службової інформації. Умови (51) та (52) резервують лише частину підканалів $k_{\text{служ}}$ протягом тривалості одного слота.

Розрахунок керуючих змінних (44) виконувався з використанням критерію оптимальності, спрямованого на економію частотного й часового ресурсів при врахуванні умов-обмежень (45)–(52):

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M x_{k,m}^n. \quad (53)$$

Використання запропонованої моделі дозволило більш повно провести облік виду MCS, що використовується станціями користувачів, а також забезпечити підвищення продуктивності безпроводової мережі в цілому. Проведений аналіз показав, що задача спільного розподілу частотного й часового ресурсів забез-

печує більш високу ефективність використання пропускної здатності низхідного каналу зв'язку стандарту IEEE 802.16, у порівнянні із задачами розподілу окремо частотного або часового ресурсів. Відзначено, що сформульована задача з розподілу підканалів і слотів низхідного каналу, з точки зору фізики процесів, що протікають у безпроводовій мережі, належить до класу задач балансування частотно-часових ресурсів – числа слотів у пакетах даних, а з математичної точки зору – це задача змішаного цілочисельного нелінійного програмування.

Установлено, що покращення ступеня балансування мережних ресурсів між станціями користувачів на 16 % (модель 1 на рис. 5) за рахунок використання моделі розподілу підканалів і часових слотів (44)–(53) дозволяє на 30–60% підвищити ймовірність виділення станціям користувачів необхідної пропускної здатності, у порівнянні з відомими методами (модель 1 на рис. 4). Також модель розподілу підканалів і часових слотів в умовах задоволення вимог щодо пропускної здатності дозволяє в середньому в 1,6 рази підвищити продуктивність низхідного каналу зв'язку.

Отримала подальший розвиток модель розподілу частотно-часового ресурсу в мережах стандарту IEEE 802.16 в умовах перевантажень, новизна якої полягає в можливості превентивного обмеження пропускної здатності, що виділяється станціям користувачів у низхідному каналі зв'язку, на основі як абсолютних, так і відносних пріоритетів. У результаті розв'язання задачі розподілу частотних підканалів і часових слотів для передачі сервісних потоків усіх станцій користувачів у низхідному каналі зв'язку в рамках запропонованої моделі забезпечувався розрахунок булевої керуючої змінної:

$$\bar{X} = \left[\frac{x_{k,m}^n}{\alpha^n} \right], (n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}). \quad (54)$$

де $\alpha^n = 1 - \frac{R^n}{R_{необ}^n}$ – величина, що моделює частку відмов в обслуговуванні n -ї

SS із пропускної здатності; R^n – пропускна здатність, виділена n -й SS.

Під час розрахунку вектора шуканих параметрів $\bar{X}$ виконувався ряд умов-обмежень. Так, розрахунок змінних $x_{k,m}^n$ проводився згідно з умовами-обмеженнями (45)–(52). Відповідно до фізики задачі, що розв'язувалась, на координати α^n вектора $\bar{X}$ накладалися такі обмеження:

$$0 \leq \alpha^n \leq 1 \quad (55) \quad \text{або} \quad \alpha^n \in \{0,1\}, \quad (56)$$

якщо на основі угоди про рівень послуг допускається (55) або не допускається (56) часткове обмеження необхідної пропускної здатності.

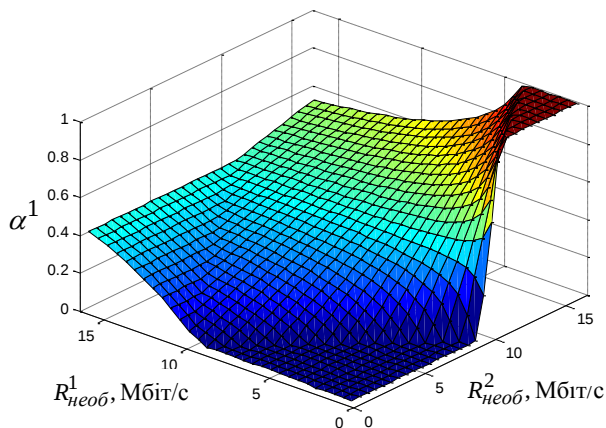
Розрахунок шуканих змінних (54) відповідно умов-обмежень (45)–(52), (55), (56) виконувався в ході розв'язання оптимізаційної задачі, забезпечуючи мінімум лінійної (57) або лінійно-квадратичної (58) цільових функцій:

$$\min_X \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N c_{k,m}^n x_{k,m}^n + \sum_{n=1}^N c^n \alpha^n \right) = \min_X C^t \bar{X}, \quad (57) \quad \min_X \left[\frac{1}{2} \bar{X}^t H \bar{X} + C^t \bar{X} \right], \quad (58)$$

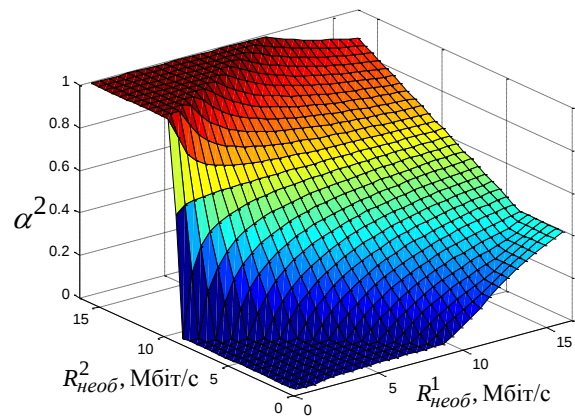
що характеризують відносні вартості розподілу пропускних здатностей.

Координати вектора $\vec{C}$ визначали величину питомого штрафу за використання підканалів і слотів низхідного каналу зв'язку ($c_{k,m}^n$) та за обмеження в обслуговуванні трафіків користувачів (c^n), за умови, що $c_{k,m}^n \ll c^n$, μ – коефіцієнт, що визначав, у скільки разів координати діагональної матриці H більше (менше) координат вектора $\vec{C}$.

Так, під час використання абсолютних пріоритетів (57), у разі, коли сума запитів від сервісних потоків станцій користувачів перевищувала пропускну здатність низхідного каналу зв'язку, превентивне обмеження зазнавав, у першу чергу, запит від низькопріоритетного сервісного потоку аж до повної відмови в доступі. Запит на пропускну здатність від сервісного потоку з вищим пріоритетом не обмежувався до тих пір, доки можна було відмовити низькопріоритетному запиту. Під час використання відносних пріоритетів (58) організовувалось більш справедливе управління, у порівнянні з абсолютними пріоритетами, що проявлялося в наявності відмов для всіх сервісних потоків, меншою мірою – високопріоритетному (рис. 6 а), а більшою – низькопріоритетному (рис. 6 б).



а) для високопріоритетного



б) для низькопріоритетного

Рис. 6. Залежність частки відмов у виділенні необхідної пропускної здатності сервісним потокам від рівня вимог до пропускної здатності ($R_{необ}^1$, $R_{необ}^2$) під час використання відносних пріоритетів (58)

Запропонована топологічна модель mesh-мережі стандарту IEEE 802.16 представлена за допомогою гіперграфів і графів Кьоніга. При цьому можливості гіперграфів використовувалися на етапі постановки задачі розподілу підканалів із метою оцінки характеристик вихідних конфігурацій mesh-мереж, а графи Кьоніга – під час порівняльного аналізу отриманих результатів. Це дозволило більш повно й детально описати можливі конфігурації як усієї mesh-мережі в цілому, так і окремих її елементів, представлених у вигляді вершин і ребер гіперграфу.

Розроблено функціональну модель розподілу частотного ресурсу в mesh-мережах стандарту IEEE 802.16, новизна якої полягає, по-перше, у формулю-

ванні задачі розподілу частотного ресурсу як задачі розподілу підканалів; по-друге, в обліку інтерференції між станціями мережі, що дозволило розширити сферу використання запропонованих рішень.

Ґрунтуючись на плоскому кьоніговому представленні mesh-мережі технології WiNAX (WMN WiMAX), вихідні дані задачі розподілу підканалів були представлені у вигляді: $I = \{n_i / i = \overline{1, N}\}$ – множина станцій, де N – їх загальна кількість у mesh-мережі; $T = \{k_t / t = \overline{1, K}\}$ – множина підканалів, де k_t – елемент множини T , що моделює t -й підканал, K – їх загальна кількість, залежно від ширини частотного каналу, що використовується; $J = \{z_j / j = \overline{1, Z}\}$ – множина зон стійкого прийому, де Z – загальна кількість зон стійкого прийому в мережі; $N(z_j) \doteq N_H(z_j) \doteq \{n_i \in I / R(n_i, z_j)\}$ – станційний розмір j -ї зони стійкого прийому mesh-мережі, тобто число станцій, що входить до складу j -ї TR.

У ході розв’язання задачі розподілу підканалів між станціями WMN WiMAX забезпечувався розрахунок булевої керуючої змінної:

$$x_{n_i, z_j}^{k_t} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t\text{-й підканал виділений } i\text{-й станції в } j\text{-й TR;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (59)$$

Розрахунок шуканих змінних $x_{n_i, z_j}^{k_t}$ виконувався відповідно до умов обмежень:

1) Умова виділення підканалів mesh-станції тільки в рамках тієї зони стійкого прийому, до якої вона належить:

$$x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq a_{z_j, n_i}, \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}, t = \overline{1, K}). \quad (60)$$

2) Умова роботи mesh-станції зі станціями всіх TR, до яких вона належить, що дозволило забезпечити високий рівень зв’язності mesh-мережі:

$$\sum_{t=1}^K x_{n_i, z_j}^{k_t} \geq a_{z_j, n_i}, \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}). \quad (61)$$

3) Умова того, що mesh-станція не повинна працювати на одному й тому ж підканалі одночасно з декількома станціями різних TR:

$$\sum_{j=1}^Z a_{z_j, n_i} x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq 1, \quad (i = \overline{1, N}, t = \overline{1, K}). \quad (62)$$

4) Умова запобігання первинній інтерференції, тобто i -а mesh-станція може обмінюватись інформацією на t -у підканалі не більше ніж з однією станцією тієї ж TR:

$$\sum_{i=1}^N a_{z_j, n_i} x_{n_i, z_j}^{k_t} \leq 1, \quad (j = \overline{1, Z}, t = \overline{1, K}). \quad (63)$$

5) Умова запобігання вторинній інтерференції, тобто mesh-станції, що знаходяться в різних TR, не повинні передавати інформацію на однаковому підканалі станції, що знаходиться на перетині цих TR:

$$\sum_{j=1}^Z [a_{z_j, n_i} \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^N (a_{z_j, n_r} x_{n_r, z_j}^{k_t})] \leq 1, \quad (t = \overline{1, K}, i = \overline{1, N}). \quad (64)$$

б) Умова балансування числа підканалів, що виділяються кожній станції:

$$\sum_{k=1}^K x_{n_i, z_j}^{k_t} \geq \chi \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, Z}), \quad (65)$$

де χ – нижній динамічно керуємий поріг числа підканалів, які виділяються кожній станції користувача в WMN WiMAX.

У рамках запропонованої моделі запропоновано використовувати критерій оптимальності спрямований на максимізацію параметра χ , тобто мінімальної кількості підканалів, виділених будь-якій станції:

$$\max_{\chi, \gamma} \chi. \quad (66)$$

Також у третьому розділі запропоновано математичну модель розподілу частотного ресурсу в мережах технології LTE, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотного ресурсу як задачі розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку для передачі інформації в напрямку станцій користувачів (User Equipment, UE) при врахуванні їх технологічних особливостей та існуючих стандартів (схеми модуляції й кодування).

У результаті розв'язання задачі розподілу підканалів, за аналогією з моделлю розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку стандарту IEEE 802.16 (37)-(43), у рамках запропонованої моделі проводився розрахунок керуючої змінної ($x_{n,k}$), що визначає порядок розподілу підканалів. Відповідно до фізики задачі, що розв'язується, на керуючу змінну накладається обмеження:

$$0 \leq x_{n,k} \leq 1, \quad (67)$$

де $k = \overline{0, K-1}$; $n = \overline{1, N}$; N – кількість UE; K – загальне число підканалів.

Під час розрахунку шуканих змінних $x_{n,k}$ виконувались обмеження:

1) Умова закріплення k -го підканалу не більше ніж за однією UE:

$$\sum_{k=1}^K x_{n,k} x_{s,k} = 0, \quad (n, s = \overline{1, N}, n \neq s). \quad (68)$$

2) Умова закріплення k -го підканалу лише за однією UE:

$$\sum_{n=1}^N x_{n,k} = 1, \quad (k = \overline{1, K}). \quad (69)$$

3) Умова задоволення вимог за пропускну здатністю для кожної UE в низхідному каналі зв'язку за обраної MCS:

$$R^n \geq R_{m\phi\delta}^n \delta_n, \quad (70)$$

де $n = \overline{1, N}$; $l = \overline{0, L-1}$; R^n – пропускна здатність, виділена n -й UE.

4) Умова балансування пропускну здатності, що виділяється UE:

$$\frac{R^n}{R_{необ}^n} \geq \beta, \quad (n = \overline{1, N}). \quad (71)$$

Розрахунок шуканих змінних (67) відповідно до умов (68)–(71) виконувався з використанням критерію оптимальності

$$\max \beta. \quad (72)$$

Використання запропонованої моделі дозволило, порівняно з відомими рішеннями, гарантувати необхідну пропускну здатність для кожної зі станцій користувачів, шляхом виділення необхідної кількості підканалів. Сформульована задача з розподілу частотного ресурсу в мережах LTE, з точки зору фізики процесів, що протікають у безпроводовій мережі, належить до класу задач балансування частотного ресурсу – підканалів, а з математичної точки зору є задачею нелінійного програмування. Показано, що запропонована модель в умовах високих вимог до пропускної здатності станцій користувачів, у порівнянні з відомими методами, дозволяє в середньому на 10 % підвищити ступінь балансування пропускних здатностей станцій користувачів (модель 2 на рис. 7) і на 12–20% ймовірність виділення станціям користувачів необхідної пропускної здатності (модель 2 на рис. 8).

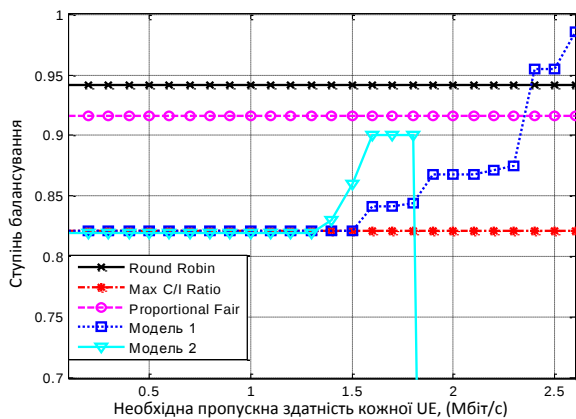


Рис. 7. Результати порівняльного аналізу ступеня балансування пропускної здатності для різних моделей розподілу RB

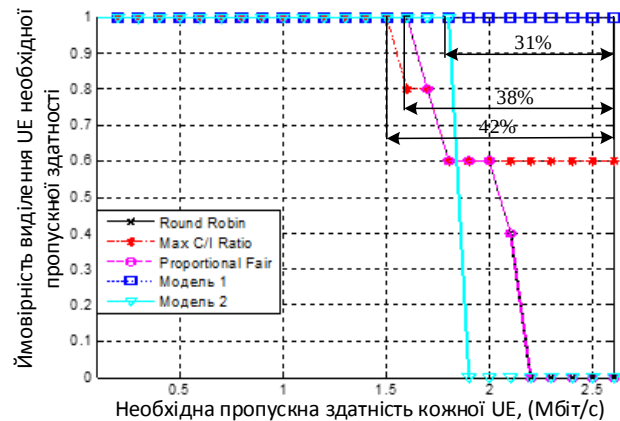


Рис. 8. Результати порівняльного аналізу ймовірності виділення UE необхідної пропускної здатності для різних моделей розподілу RB

Також запропоновано модель розподілу частотно-часового ресурсу низхідного каналу зв'язку в мережах технології LTE, новизна якої полягає у формулюванні задачі розподілу частотно-часового ресурсу як задачі розподілу ресурсних блоків між станціями користувачів мережі під час врахування показників якості обслуговування (необхідної пропускної здатності станцій користувачів), схеми модуляції та кодування, виду поділу низхідного й висхідного каналів зв'язку (частотного або часового поділу), службової інформації в низхідному каналі зв'язку безпроводової мережі, що дозволило забезпечити підвищення продуктивності безпроводової мережі в цілому шляхом більш ефективного, порівняно з відомими рішеннями, розподілу частотно-часового ресурсу, а також гарантувати виконання вимог станцій користувачів за пропускну здатністю.

У ході розв'язання задачі розподілу RB у рамках запропонованої моделі виконувався розрахунок булевої керуючої змінної ($x_{k,m}^n$), що визначала порядок розподілу RB:

$$x_{k,m}^n = \begin{cases} 1, & \text{якщо } k\text{-й RB на } m\text{-у підкадрі виділений } n\text{-й UE;} \\ 0, & \text{у протилежно му випадку.} \end{cases} \quad (73)$$

Під час розрахунку змінних $x_{k,m}^n$ забезпечувалось виконання умов:

1) Умова закріплення k -го RB низхідного каналу зв'язку протягом передачі m -го підкадру не більше ніж за однією UE:

$$\sum_{n=1}^N x_{k,m}^n \leq 1, \quad (k = \overline{0, K-1}; m = \overline{0, M-1}). \quad (74)$$

2) Умова виділення станції користувача RB тільки низхідного каналу зв'язку згідно з l -ю конфігурацією кадру:

$$\frac{\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=1}^N x_{k,m}^n}{K} \leq h_{l,m}, \quad (m = \overline{0, M-1}). \quad (75)$$

3) Умова закріплення за n -ю UE кількості RB, що забезпечує необхідну пропускну здатність у низхідному каналі відповідно до обраної MCS:

$$R^n \geq R_{необ}^n \quad (76)$$

де R^n – пропускну здатність виділена n -й UE; $n = \overline{1, N}$.

4) Умова об'єднання RB у групи ресурсних блоків (Resource Block Group), сумарні розміри яких задовольняють ширині частотного каналу, що використовувався, відповідно до нульового типу розподілу ресурсів (Resource Allocation Type 0):

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{p} \sum_{z=\left\lfloor \frac{k}{p} \right\rfloor p}^{\left(\left\lfloor \frac{k}{p} \right\rfloor + 1 \right) p - 1} x_{z,m}^n, \quad (n = \overline{1, N}; m = \overline{0, M-1}; k = 0, \left\lfloor \frac{K}{p} \right\rfloor p - 1); \quad (77)$$

$$x_{k,m}^n = \frac{1}{p} \sum_{z=\left\lfloor \frac{K}{p} \right\rfloor p}^K x_{z,m}^n, \quad (n = \overline{1, N}; m = \overline{0, M-1}; k = \left\lfloor \frac{K}{p} \right\rfloor p - 1, K), \quad (78)$$

де $\lfloor \cdot \rfloor$ – процедура пошуку найменшого цілого.

Задача розподілу RB розв'язувалась із використанням критерію оптимальності, спрямованого на максимізацію загальної продуктивності низхідного каналу зв'язку:

$$\max \sum_{n=1}^N R^n \quad (79)$$

за умови врахування обмежень (74)–(78).

Запропонована модель за рахунок покращення на 5–20% ступеня балансування пропускну здатності низхідного каналу зв'язку (модель 1 на рис. 7) дозво-

ляє на 60–75 % підвищити ймовірність виділення станціям користувачів необхідної пропускної здатності у порівнянні з відомими методами (модель 1 на рис. 8).

У **четвертому розділі** запропонована потокова модель управління трафіком з урахуванням втрат пакетів на вузлах телекомунікаційної мережі, викликаних перевантаженням черг на їх інтерфейсах. З метою врахування можливих втрат пакетів у поточковій моделі модифікована умова збереження потоку як окремо у вузлах (маршрутизаторах), так і в мережі в цілому:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{(i,j)}^{h_k} = 1 - \omega^{h_k} \text{ при } k \in K, i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{(i,j)}^{h_k} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{(j,i)}^{h_k} (1 - p_{(j,i)}^{h_k}) = 0 \text{ при } k \in K, i \neq s_{h_k}, d_{h_k}; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} x_{(j,i)}^{h_k} (1 - p_{(i,j)}^{h_k}) = \varepsilon^{h_k} \text{ при } k \in K, i = d_{h_k}, \end{cases} \quad (80)$$

де K – множина потоків у мережі; H – множина класів обслуговування; s_{h_k} – вузол-відправник; d_{h_k} – вузол-отримувач для пакетів k -го потоку h -го класу обслуговування; ω^{h_k} – частка k -го потоку h -го класу, що отримав відмову в обслуговуванні мережею на прикордонному вузлі-відправнику; ε^{h_k} – частка k -го потоку h -го класу, що був обслугований мережею, тобто пакети якого успішно доставлені до вузла-отримувача; $p_{(i,j)}^{h_k}$ – ймовірність втрат пакетів k -го потоку h -го класу обслуговування на j -му інтерфейсі i -го вузла через його перевантаження.

Новизною запропонованої моделі є також опис у рамках умов збереження потоку можливості адаптивного обмеження інтенсивності потоків, що надходять в мережу (профілювання трафіка), за рахунок уведення додаткових управляючих змінних. Тим самим вдалося узгодити розв'язання задач маршрутизації і профілювання трафіка, установивши однозначний взаємозв'язок між управляючими змінними, що відповідають за вирішення цих завдань у рамках модифікованої умови збереження потоку (80).

Частка відмов в обслуговуванні пакетів k -го потоку h -го класу підпорядковується одній із двох умов:

$$0 \leq \omega^{h_k} \leq 1, \quad \text{або} \quad \omega^{h_k} \in \{0;1\}. \quad (81)$$

Із врахуванням можливих втрат пакетів інтенсивність потоку в каналі $(i,j) \in V$ у рамках вище введених позначень розраховувалась як

$$\lambda_{(i,j)} = \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{(i,j)}^{h_k} (1 - p_{(i,j)}^{h_k}), \quad (82)$$

де $\lambda_{h_k}^{\langle \text{вим} \rangle}$ – середня інтенсивність k -го потоку h -го класу, що надходить у мережу на обслуговування (QoS-вимоги за швидкістю передачі пакетів).

Для реалізації багатопляхової стратегії маршрутизації з балансуванням навантаження на управляючі змінні накладались обмеження виду:

$$0 \leq x_{(i,j)}^{h_k} \leq 1. \quad (83)$$

Для забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням каналів і черг, тобто для виконання умови $\rho < 1$, у структуру моделі введені такі обмеження:

$$\sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{(i,j)}^{h_k} < \phi_{(i,j)}^h, \quad (i,j) \in E, \quad (84)$$

де $\phi_{(i,j)}^h$ – пропускна здатність j -го інтерфейсу i -го вузла, що виділена для обслуговування пакетів h -го класу. Ця змінна також виступає в ролі керуючої, так як вона визначає порядок розподілу пропускних здатностей каналів зв'язку між потоками користувачів різних класів. Виходячи з фізичного смислу даних змінних, на них накладаються такі обмеження, як

$$0 \leq \phi_{(i,j)}^h \quad \text{та} \quad \sum_{h \in H} \phi_{(i,j)}^h \leq \phi_{(i,j)}. \quad (85)$$

У задачі управління трафіком як критерій оптимальності отриманих рішень обрано вираз

$$\min_{x, \omega, \phi} \left[\left(\sum_{h \in H} a^h \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle \text{вим} \rangle} \omega^{h_k} \right) + \left(\sum_{h \in H} \frac{1}{a^h} \phi_{(i,j)}^h \right) + \left(\sum_{h \in H} \frac{1}{a^h} \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{(i,j)}^{h_k} \right) \right], \quad (86)$$

який враховує витрати на відмови в обслуговуванні (перший доданок), а також на використання (другий доданок) і завантаженість каналних ресурсів ТКС (третій доданок). Вагові коефіцієнти a^h можуть, у загальному випадку, відображати пріоритет потоків трафіка h -го класу.

У розділі показано, що запропонована модель (80)-(86) є більш адекватною, порівняно з відомими, в умовах високої завантаженості мережі ($\rho \geq 0,5$). Її застосування дозволяє більш точно (в середньому на 3–4%) оцінити швидкісні показники QoS (інтенсивність обслугованого трафіка) і, що дуже важливо, показники надійності (ймовірність втрат пакетів). Варто відзначити, що запропонована модель орієнтована як на використання схеми Tail Drop, коли відкидання пакетів із черги на кожному з інтерфейсів вузла відбувається, зважаючи на її фактичне переповнення, так і на механізми активного управління чергами (Active Queue Management, AQM), що виконують превентивне відкидання пакетів.

Запропоновано тензорну модель управління трафіком у безпроводовій телекомунікаційній системі з підтримкою якості обслуговування за множиною показників, яка заснована на вдосконаленій версії умов збереження потоку, що дозволило провести облік можливих втрат пакетів і відмов в обслуговуванні на кордоні ТКС. При цьому описання ТКС виконувалось за допомогою змішаного двовалентного тензору (один раз ко- і один раз контрваріантного)

$$Q = T \otimes \Lambda, \quad (87)$$

де T – одновалентний коваріантний тензор середніх затримок пакетів; Λ – одновалентний контрваріантний тензор пакетної інтенсивності потоку.

Сумарна інтенсивність втрачених на всіх інтерфейсах маршрутизаторів ТКС пакетів обраного потоку розраховувалась з виразу:

$$\lambda^{\langle emp \rangle} = \sum_{j=2}^{\phi} \lambda_{\eta}^j, \quad (88)$$

тоді

$$\sum_{j=2}^{\phi} \lambda_{\eta}^j \leq \lambda^{\langle sum \rangle} p_{\langle don \rangle} \quad (89)$$

– умова забезпечення якості обслуговування за показниками надійності доставки пакетів; $p_{\langle don \rangle}$ – допустима ймовірність втрати пакетів.

Завдяки тензорній формалізації моделі ТКС вдалося отримати в аналітичному вигляді умови забезпечення якості обслуговування одночасно за множиною різнорідних показників – швидкістю передачі, середньою затримкою та ймовірністю втрат пакетів під час реалізації багатопотокової стратегії маршрутизації, динамічним профілюванням трафіка і розподілом пропускної здатності каналів зв'язку між потоками різних класів обслуговування:

$$\lambda^{\langle sum \rangle} (1 - p_{\langle don \rangle}) (1 - \omega) \leq G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1} + \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle don \rangle}, \quad (90)$$

$$\text{де } \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \\ \hline G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \end{array} \right\| = G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}; \quad \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle} \\ \hline G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} \end{array} \right\| = G_{\pi\eta}, \text{ причому } G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle}, G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} - \text{квад-}$$

ратні підматриці розміру $\mu \times \mu$ і $\phi \times \phi$ відповідно; $G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle}$ – підматриця розміру $\mu \times \phi$; $G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle}$ – підматриця розміру $\phi \times \mu$; $G_{\pi\eta} = A^t G_v A$ – проекція метричного тензора G у системі координат контурів (μ) і вузлових пар (ϕ); A – коваріантний закон перетворення координат; G_v – діагональна матриця, координати якої залежать від прийнятих моделей потоку пакетів та дисципліни їх обслуговування; $\Lambda_{\eta-1}$ – вектор інтенсивностей втрат пакетів на маршрутизаторах ТКС із координатами (88); $\tau_{\langle don \rangle}$ – допустима міжкінцева середня затримка пакетів.

Використання моделі (87)–(90) дозволило підвищити адекватність опису ТКС, а також узгодженість рішень з управлінням трафіком із підтримкою якості обслуговування. Важливо зазначити, що отримані умови забезпечення якості обслуговування (90) за своєю формою є інваріантними, тобто їх вид не залежить від моделей трафіка та обслуговування пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів ТКС, які використовуються. Облік цих факторів спричиняє лише модифікації метрики, що вводиться при тензорній геометризції мережі та задається елементами діагональної матриці G_v . Як приклад у роботі характеристики трафіка та дисципліни обслуговування пакетів на маршрутизаторах ТКС задавалися за допомогою систем масового обслуговування $M/M/1/N$ та $SS/M/1/N$.

Результати числового аналізу запропонованого і раніше відомих рішень з точки зору якості обслуговування продемонстрували переваги тензорного підходу до моделювання процесів управління трафіком, що проявлялося в покращенні

щенні міжкінцевої багатошляхової затримки від 65 до 180 %, імовірності своєчасної доставки пакетів в середньому на 20–30% (рис. 9).

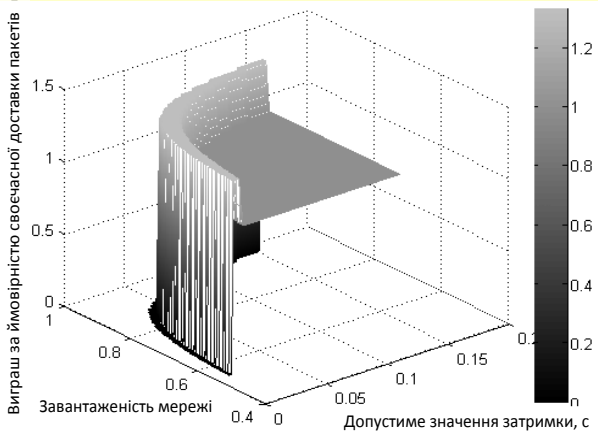
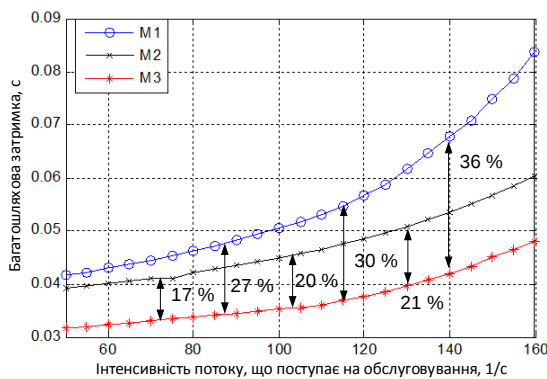


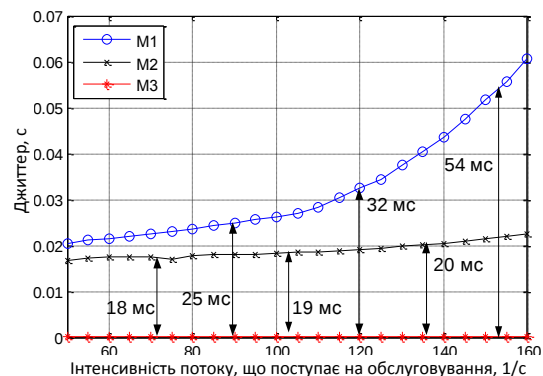
Рис. 9. Виграш за ймовірністю своєчасної доставки, який досягається в рамках запропонованої моделі в порівнянні зі збалансованим розподілом мережних ресурсів відповідно до концепції Traffic Engineering

Установлено, що під час врахування можливих втрат пакетів запропонована тензорна модель управління трафіком (М3 на рис. 10, а) забезпечує виграш за багатошляховою затримкою, у порівнянні з відомими найбільш ефективними моделями балансування навантаження (М1 і М2 на рис. 10, а) на величину від 15 до 40 % за одних і тих же значень інтенсивності потоку, що надходить у мережу, та допустимий ймовірності втрат пакетів. При цьому найбільший виграш на 40–50 % та 10–20 % (рис. 10, а) спостерігався відповідно в області середніх і високих навантажень ($\rho = 0,6 \div 0,8$), що визначило сферу ефективного використання за-

пропонованих рішень. Під час використання запропонованих рішень відзначалась практична відсутність багатошляхового джиттера (рис. 10 б), обумовленого диференціацією затримок пакетів, що передаються вздовж різних шляхів.



а)



б)

Рис. 10. Залежність міжкінцевої багатошляхової затримки (а) і джиттера (б) від інтенсивності потоку, що надходить у мережу за $p_{\langle don \rangle} = 1 \cdot 10^{-3}$ в умовах моделі $SS/M/1/N$

Показано, що застосування запропонованої моделі за рахунок забезпечення узгодженого розв'язання задач багатошляхової маршрутизації і профілювання трафіка в умовах перевантаження буферів черг дозволяє знизити частку потоку, який отримав відмову в обслуговуванні, у порівнянні з відомими моделями за одних і тих же допустимих величин середньої затримки та ймовірності втрат пакетів. Так вдалося зменшити відмови в обслуговуванні в середньому на 60–75 %

(наприклад, за $\tau_{\langle don \rangle} \leq 0,05\text{с}$) у випадку використання моделі $M/M/1/N$, і на 80 % (наприклад, за $\tau_{\langle don \rangle} \leq 0,04\text{с}$) у разі використання моделі $SS/M/1/N$.

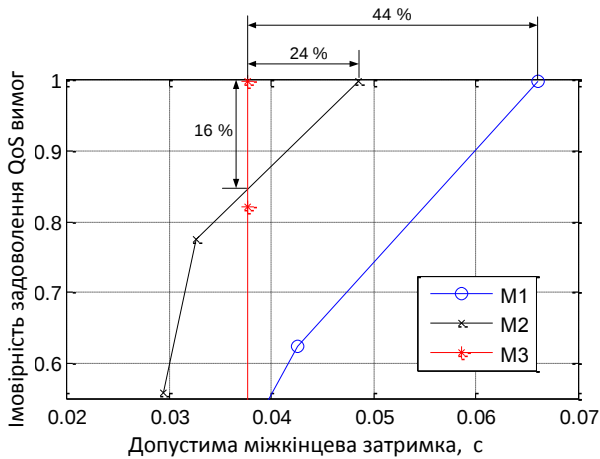


Рис. 11. Залежність ймовірності задоволення QoS-вимог від допустимої міжкінцевої середньої затримки за $P_{\langle don \rangle} = 1 \cdot 10^{-3}$, $\lambda^{\langle вим \rangle} = 120 \text{ 1/с}$ в умовах моделі $SS/M/1/N$

Загалом застосування запропонованої моделі дозволяє підвищити ймовірність комплексного задоволення QoS-вимог за множиною показників в середньому на 17–50 % порівняно з відомими моделями (рис. 11), тим самим знизивши відмови в обслуговуванні, обумовлених невиконанням заданого рівня якості обслуговування.

У п'ятому розділі за допомогою пакета імітаційного моделювання ns3 проведено експертне дослідження запропонованих у роботі моделей та методів управління мережними ресурсами. Результати дослідження підтвердили адекватність використаних моделей, яка оцінювалась за збіжністю результатів аналітичного та імітаційного моделювання.

У ході дослідження встановлено, що використання запропонованої двохіндексної моделі розподілу ЧК, що не перекриваються, дозволило на 20–25 % підвищити продуктивність MR MC WMN. Крім того, встановлено, що використання запропонованого ієрархічно-координаційного методу на основі принципу прогнозування взаємодій дозволило на 20–30 % покращити продуктивність MR MC WMN, у порівнянні з відомим методом, заснованим на принципі цільової координації. За допомогою пакета LTE Downlink Resource Element Visualization v1.1 вдалося підтвердити адекватність запропонованих моделей із розподілу частотного й часового ресурсів в низхідному каналі зв'язку технології LTE щодо обсягів службової інформації, яка передається ресурсними блоками.

У розділі розроблені науково-методичні рекомендації щодо практичного використання запропонованих у роботі рішень як у рамках існуючих стандартів безпроводового зв'язку (IEEE 802.11, IEEE 802.16, 3GPP LTE), так і в рамках перспективних телекомунікаційних технологій.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова проблема, яка полягає в розвитку теорії оптимального розподілу мережних ресурсів безпроводових ТКС в умовах їх обмеженості шляхом розробки й удосконалення засобів підвищення їх продуктивності на основі використання гіперграфових і тензорних моделей та методів. За підсумками вирішення поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. В результаті проведеного аналізу встановлено, що важливе місце в сучасній телекомунікаційній інфраструктурі займають безпроводові телекомунікаційні системи, які представляють собою досить складний комплекс технічних і програмних засобів передачі, обробки та розподілу інформації. Проте основним стримуючим фактором повсюдного впровадження безпроводових ТКС є низька якість надаваних послуг зв'язку, що обумовлюється їх низькою продуктивністю або неправильним розподілом мережних ресурсів.

2. Огляд існуючих підходів щодо підвищення продуктивності безпроводових ТКС показав, що найбільшим ефективним напрямом є управління ресурсами каналного й мережного рівнів (частотними, часовими, буферними, інформаційними, обчислювальними, трафіком), які в різних технологіях безпроводового зв'язку організовані по-різному, тому принципи управління мережними ресурсами значно відрізняються. Це й визначило необхідність удосконалення (модернізації) безпроводових ТКС шляхом розробки моделей та методів підвищення їх продуктивності на основі оптимального розподілу мережних ресурсів, з урахуванням технологічних принципів побудови, а також теоретичних і методологічних підходів.

3. Результати проведеного аналізу існуючих моделей і методів розподілу мережних ресурсів у безпроводових ТКС стандартів IEEE 802.11, IEEE 802.16 і технології LTE продемонстрували виникнення значних складнощів під час забезпечення необхідного рівня продуктивності й заданої якості обслуговування. Показано, що вихід із ситуації, що склалася, бачиться в розвитку теорії оптимального управління мережними ресурсами шляхом розробки ефективного інструментарію у вигляді відповідних моделей і методів підвищення продуктивності безпроводових ТКС для адекватної формалізації і високої якості вирішення загальносистемних проблем та окремих завдань управління мережними ресурсами.

4. Наведено топологічний опис MR MC WMN стандарту IEEE 802.11, представленої гіперграфовою моделлю. Запропонований математичний апарат належним чином може бути використаний на етапі постановки задачі розподілу ЧК, що не перекриваються, з метою оцінки характеристик вихідних конфігурацій WMN, а також під час порівняльного аналізу результатів її розв'язання.

5. У роботі вдосконалено функціональну модель розподілу ЧК, що не перекриваються, у MR MC WMN стандарту IEEE 802.11. Запропонована модель, на відміну від раніше відомих рішень, дозволяє, по-перше, істотно знизити розмірність задачі й підвищити, тим самим, масштабованість кінцевих рішень, по-друге, забезпечити зв'язність mesh-станцій, доменів колізій та мережі в цілому, у разі використання трьох і більше ЧК, які не перекриваються, що розширило сферу застосування запропонованих рішень. Також у моделі запропоновано критерій оптимальності, представлений квадратичною формою від числа станцій, що формують домени колізій у рамках тієї або іншої зони стійкого прийому, що дозволило забезпечити більш ефективне використання (балансування) мережних ресурсів, числа mesh-станцій у доменах колізій, а також підвищити продуктивність мережі та якість обслуговування в цілому.

6. З метою підвищення масштабованості отриманих рішень удосконалена двохіндексна математична модель розподілу ЧК у MR MC WMN стандарту

IEEE 802.11 шляхом її декомпозиції. Удосконалення моделі полягало в її доповненні умовою ідентичного управління станціями, які перебувають одночасно в декількох зонах стійкого прийому й декомпозиційному представленні умов зв'язності mesh-мережі. Декомпозиційна модель забезпечила відносну незалежність під час розв'язання задач розподілу ЧК за окремими доменами колізій, що прямо пов'язано з масштабністю отриманих рішень.

7. На базі декомпозиційної моделі розроблено ієрархічно-координаційний метод розподілу ЧК у MR MC WMN стандарту IEEE 802.11. Особливістю методу є введення дворівневої ієрархії mesh-станцій на основі принципу прогнозування взаємодій. Використання запропонованого методу розподілу ЧК дозволило значно скоротити розмірність задачі нижнього рівня без істотного навантаження на координаторів другого рівня. З технологічної точки зору це сприяло зниженню інерційності управління та обсягів циркулюючої інформації про стан mesh-мережі, яку необхідно постійно оновлювати в ході оптимізації розподілу ЧК, а в підсумку свідчило про підвищення масштабованості отриманих у роботі рішень.

8. Ґрунтуючись на плоскому кьоніговому представленні MR MC WMN стандарту IEEE 802.11, у роботі розв'язано задачу потокової маршрутизації, яка полягає у визначенні тих доменів колізій, через які має бути переданий трафік від відправника до одержувача. Використання запропонованої потокової моделі маршрутизації дозволило на основі більш повного врахування особливостей побудови MR MC WMN формалізувати умови збереження потоку як в окремих станціях, так і в усіх доменах колізій, на які декомпозиціювалась вихідна mesh-мережа після розв'язання задачі розподілу ЧК, що не перекриваються.

9. Запропоновано модель, яка виконує узгоджене розв'язання задач розподілу ЧК, що не перекриваються, і потокової маршрутизації в MR MC WMN стандарту IEEE 802.11, заснованої на використанні гіперграфів і графів Кьоніга. Якщо в наведених раніше рішеннях задача розподілу ЧК, що не перекриваються, була орієнтована на отримання зв'язної збалансованої за пропускну здатністю структури mesh-мережі, то в рамках запропонованої моделі розв'язання зазначених задач підпорядковано єдиній спільній меті – підвищенню міжкінцевої якості обслуговування за показниками продуктивності за рахунок узгодженого використання мережних ресурсів MR MC WMN стандарту IEEE 802.11, що особливо проявлялося під час збільшення ступеня перекриття зон стійкого прийому, числа РІ на mesh-станціях і кількості ЧК, що не перекриваються і підтримуються в мережі.

10. З метою підвищення продуктивності мереж стандарту IEEE 802.16 запропоновано систему математичних моделей розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку. Запропоновані моделі можуть бути використані для мереж стандарту IEEE 802.16, що використовують метод OFDMA як із фіксованим, так і з масштабованим «вікном» ШПФ. Використання запропонованої системи моделей дозволило провести, по-перше, більш повний облік технологічних особливостей стандарту IEEE 802.16 (кількості піднесних у підканалі, кількості підканалів у частотному каналі, схеми модуляції і кодування сигналу) порівняно з відомими рішеннями, заснованими на розподілі піднесних, по-друге, гарантувати необхідну пропускну здатність для кожної зі станцій користувачів

шляхом виділення необхідної кількості підканалів, по-третє, провести облік характеристик масштабованого варіанта методу OFDMA, що виконує вибір необхідної ширини частотного каналу. З метою зниження складності обчислювальної реалізації запропонованих рішень запропоновано до використання підхід, заснований на відмові від цілочисельності управляючих змінних, що дозволило реалізовувати шуканий розподіл мережних ресурсів у реальному часі без втрати якості кінцевих рішень.

11. Запропоновано модель розподілу підканалів і часових слотів низхідного каналу зв'язку в мережах стандарту IEEE 802.16, що використовують метод OFDMA. Використання запропонованої моделі дозволило більш повно провести облік виду схеми модуляції і кодування сигналу станцій користувачів, а також забезпечити підвищення продуктивності безпроводової мережі в цілому, у тому числі за рахунок зменшення обсягу службової інформації, що передається низхідним каналом зв'язку. Також в роботі запропоновано модель, яка дозволяє виконати розподіл підканалів і часових слотів низхідного каналу зв'язку в умовах перевантажень, що дозволило виконати превентивне обмеження пропускну здатності станцій користувачів у низхідному каналі зв'язку, що організує управління запитами на основі як абсолютних, так і відносних пріоритетів.

12. Уперше запропоновано підхід до використання гіперграфів і графів Кьоніга під час моделювання WMN стандарту IEEE 802.16. Запропонований математичний апарат гіперграфів належним чином може бути використано на етапі постановки задачі розподілу підканалів, із метою оцінки характеристик вихідних конфігурацій mesh-мереж, а математичний апарат графів Кьоніга – під час порівняльного аналізу результатів її розв'язання. На основі гіперграфового подання WMN стандарту IEEE 802.16 запропоновано математичну модель розподілу частотного ресурсу. У рамках запропонованої моделі задача розподілу частотного ресурсу, з урахуванням технологічних особливостей мереж стандарту IEEE 802.16, сформульована як задача розподілу підканалів. Використання запропонованої моделі дозволило усунути небажану інтерференцію між станціями мережі, що дозволило розширити сферу використання запропонованих рішень.

13. З метою підвищення продуктивності мереж технології LTE запропоновано систему математичних моделей розподілу частотного та часового ресурсів. Модель розподілу частотного ресурсу представлена у вигляді задачі розподілу підканалів низхідного каналу зв'язку. Використання запропонованої моделі дозволило підвищити ймовірність виділення станціям користувачів необхідної пропускну здатності, підвищити продуктивність низхідного каналу зв'язку шляхом ефективного управління частотним ресурсом, провести облік технологічних особливостей низхідного каналу зв'язку, а також існуючих стандартів (схеми модуляції і кодування, побудови кадру, кількість ресурсних блоків і т.д.).

Також розроблена модель розподілу частотно-часового ресурсу низхідного каналу зв'язку в мережах технології LTE, що представлена у вигляді задачі розподілу ресурсних блоків між станціями користувачів мережі, яка дозволила, порівняно з відомими рішеннями, підвищити продуктивності безпроводової мережі, а також ймовірність виділення станціям користувачів необхідної пропускну здатності. У рамках моделі проведено облік показників якості обслугову-

вання (необхідної пропускної здатності станцій користувачів), схеми модуляції та кодування, виду поділу низхідного й висхідного каналів зв'язку (частотний або часовий поділ), службової інформації, що формується в низхідному каналі зв'язку безпроводової мережі.

14. Запропоновано тензорну модель управління трафіком у безпроводовій ТКС із підтримкою якості обслуговування за множиною показників. У рамках моделі був виконаний перехід до оновленої версії умов збереження потоку, що враховують як можливі втрати пакетів, викликані переповненням буфера черг на маршрутизаторах мережі в умовах реалізації алгоритмів активного управління чергами, так і можливі відмови в обслуговуванні на границі ТКС. Крім того, у запропонованій моделі здійснена тензорна формалізація умов забезпечення якості обслуговування одночасно за множиною різнорідних показників – швидкістю передачі, середньою затримкою та ймовірністю втрат пакетів під час реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації, динамічним профілюванням трафіка й розподілом пропускної здатності каналів зв'язку між потоками різних класів обслуговування. Це дозволило підвищити адекватність опису ТКС, а також узгодженість рішень щодо управління трафіком із підтримкою якості обслуговування.

15. У результаті експериментального аналізу розроблених моделей і методів, проведеного на основі дослідження імітаційної моделі ТКС у рамках пакета ns3 і LTE Downlink Resource Element Visualization v1.1, засвідчено достатній рівень їх адекватності та ефективності під час розв'язання задач управління мережними ресурсами. При цьому зазначено, що адекватність моделей і методів багато в чому визначається адекватним урахуванням достатньої кількості факторів, які впливають на розв'язання поставлених задач, а також вихідних даних, визначених технологічними особливостями й отриманими із практики.

16. Показано, що запропоновані в роботі моделі й методи розподілу мережних ресурсів можуть знайти свою безпосередню реалізацію в ряді поширених нині і перспективних технологій безпроводового зв'язку, орієнтованих на надання послуг зв'язку гарантованої якості. Це, насамперед, стосується безпроводових технологій, що використовуються в якості транспортної платформи, а саме – WMN стандарту IEEE 802.11 і 802.16, і технологій, які використовуються в мережах доступу – WiMAX і LTE.

17. Отримані в роботі результати були використані: під час розробки методів і практичних реалізацій щодо підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління в ході виконання НДР № 261 та НДР № 271-1 (ХНУРЕ); під час побудови та підвищення продуктивності безпроводової ланки телекомунікаційної мережі Вищого навчального закладу Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі»; у телекомунікаційних організаціях (Науково-виробнича організація з обмеженою відповідальністю «СОЛВЕР», Центр обслуговування мережі в м. Полтава ТОВ «Велтон.Телеком»). Отримані результати також використовувалися в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки, зокрема, у дисципліні «Перспективні безпроводові мережі».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гоголева М. А. Экспериментальное исследование математической модели распределения каналов в многоканальных MESH-сетях стандарта IEEE 802.11 / М. А. Гоголева, С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Радиотехника: Всеукр. Межвед. научн.-техн. сб. – 2010. – Вып. 163. – С. 99-107.
2. Лемешко А. В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А. В. Лемешко, С. В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникацій. – 2011. – № 2 (4). – С. 139–149. – Режим доступа до журн. : http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf.
3. Гаркуша С. В. Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / С. В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникацій. – 2011. – № 3 (5). – С. 38–57. – Режим доступа до журн. : http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf.
4. Гаркуша С. В. Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша // Цифрові технології. – 2011. – Вып. 10. – С. 27-42.
5. Гаркуша С. В. Огляд та класифікація протоколів маршрутизації в mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 14–23.
6. Гаркуша С. В. Разработка и анализ модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 / С. В. Гаркуша // Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекоммунікації. – 2012. – № 738. – С. 177–185.
7. Гаркуша С. В. Разработка и анализ масштабируемой модели распределения подканалов в сети стандарта IEEE 802.16 / С. В. Гаркуша // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2012. – Вип. 4 (33). – С. 68–74.
8. Евсеева О. Ю. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания [Электронный ресурс] / О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникацій. – 2012. – № 3 (8). – С. 24–46. – Режим доступа до журн. : http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf.
9. Lemeshko O. V. Reliability Tensor Model of Telecommunication Network with RED / O. V. Lemeshko, O. Yu. Yevsyeyeva, S. V. Garkusha // Radioelectronics and Informatics. – 2012. – № 4 (59). – P. 40–44.
10. Гаркуша С. В. Сравнительный анализ критериев оптимальности распределения частотных каналов в mesh-сети IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша, Е. В. Гаркуша // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 4 (24). – С. 125–131.
11. Гаркуша С. В. Модель планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша, Ю. А. Василенко //

Научно-технический Вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – Вып. 3 (85). – С. 92–98.

12. Гаркуша С. В. Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша // Грузинский электронный научный журнал : Компьютерные науки и телекоммуникации. – 2013. – Вып. 3 (39). – С. 76–94.

13. Гаркуша С. В. Модель распределения слотов и формирования пакетов данных в нисходящем канале связи технологии WiMAX / С. В. Гаркуша // Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. – 2014. – Вып. 2. – С. 3–18.

14. Лемешко А. В. Потокковая модель маршрутизации с учетом потерь пакетов на узлах телекоммуникационной сети / А. В. Лемешко, О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 2. – С. 52–60.

15. Лемешко О. В. Модель превентивного обмеження швидкості передачі низхідного каналу зв'язку технології WiMAX в умовах перевантажень / О. В. Лемешко, С. В. Гаркуша // Вісник національного університету «Львівська політехніка» : Радіoeлектроніка та телекомунікації. – 2013. – № 766. – С. 132–138.

16. Гаркуша С. В. Модель распределения пропускной способности нисходящего канала связи технологии WiMAX с ограничением скорости передачи / С. В. Гаркуша // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 11, № 3. – С. 18–23.

17. Garkusha S. V. The service required quality ensure model of LTE technology downlink / S. V. Garkusha, A. K. Al-Dulaimi, K. H. Al-Janabi // Восточно-Европейский журнал передовых технологий «Информационно-управляющие системы». – 2013. – Вып. 4/9 (64). – С. 35–38.

18. Лемешко А. В. Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях / А. В. Лемешко, О. Ю. Евсеева, С. В. Гаркуша // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 38–54.

19. Гаркуша С. В. Модель сбалансированного распределения подканалов в mesh-сети, использующей технологию WiMAX / С. В. Гаркуша, Ахмед Хассан Абед, Е. В. Гаркуша // Системи обробки інформації : зб.наукових праць. – 2013. – Вип. 9 (116). – С. 135–140.

20. Гаркуша С. В. Особенности использования гиперграфов при моделировании многоканальных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11 / С.В. Гаркуша // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2013. – Вып. 175. – С. 160–169.

21. Гаркуша С. В. Модель планирования пакетов данных в технологии WiMAX / С. В. Гаркуша // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2013. – Ч. 1. – С. 74–77.

22. Гаркуша С. В. Иерархическо-координационный метод распределения частотных каналов в mesh-сети IEEE 802.11 на основе принципа прогнозирования

ния взаимодействий / С. В. Гаркуша // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – Вып. 1 (31). – С. 156–166.

23. Гаркуша С. В. Результаты разработки модели распределения подканалов в сети WiMAX / С. В. Гаркуша, Е. В. Гаркуша // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 2 (118). – С. 153–159.

24. Гаркуша С. В. Модель выделения необходимой скорости передачи в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша, Е. В. Гаркуша // Радиотехника. Всеукр. міжвед. научн.-техн. сб. – 2014. – Вып. 176. – С. 221–228.

25. Гаркуша С. В. Разработка потоковой модели маршрутизации в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11, представленных в виде графа Кенига [Электронный ресурс] / С. В. Гаркуша // Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 1 (13). – С. 20–34. – Режим доступа до журн. : http://pt.journal.kh.ua/2014/1/1/141_garkusha_routing.pdf.

26. Гаркуша С. В. Разработка модели согласованного решения задач распределения неперекрывающихся частотных каналов и потоковой маршрутизации в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / С. В. Гаркуша // Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 2 (14). – С. 3–29. – Режим доступа до журн. : http://pt.journal.kh.ua/2014/2/1/142_garkusha_mesh.pdf.

27. Лемешко А. В., Гаркуша С. В. Обеспечения качества обслуживания в условиях согласованного решения задач управления трафиком в телекоммуникационной сети [Электронный ресурс] / А. В. Лемешко, С. В. Гаркуша // Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 2 (14). – С. 52–66. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2014/2/1/142_lemeshko_qos.pdf.

28. Гаркуша С. В. Модель планирования пакетов данных в технологии WiMAX / С. В. Гаркуша // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2014. – Ч. 1. – С. 185–188.

29. Lemeshko A. V. Research on tensor model of multipath routing in telecommunication network with support of service quality by greater number of indices / A. V. Lemeshko, O. Yu. Evseeva, S. V. Garkusha // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, № 15. – P. 1339–1360.

30. Лемешко А. В. Симплициальные модели анализа основных структурных свойств территориально-распределенной телекоммуникационной сети / А. В. Лемешко, С. В. Гаркуша, С. В. Бабенко // Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях : труды научно-технической конференции с международным участием, Харьков, 18–21 января 2010 г. Ч. 2. : тезисы докл. – Х. : ХНУ, 2010. – С. 148–152.

31. Гаркуша С. В. Симплициальная модель оценки структурной связности MESH-сети / С. В. Гаркуша // Сучасні проблеми телекомунікацій – 2010 : матеріали науково-практичної конференції, Львів, 28–30 жовтня 2010 г. : тези доп. – Л. : НУ «Львівська політехніка», 2010. – С. 43–46.

32. Гоголева М. О. Модель розподілу частотних каналів в багатоканальних MESH-мережах стандарту IEEE 802.11 / М. О. Гоголева, С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Нові технології в телекомунікаціях : IV міжнародний науко-

во-технічний симпозиум, Київ, 18-21 січня 2011 р. : тези доп. – К. : ДУІКТ, 2011. – С. 154–156.

33. Gogolieva M. A Mathematical Model of Channel Distribution in Multichannel Mesh Networks 802.11 / M. Gogolieva, S. Garkusha, Ahmed H. Abed // The Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2011) : proceedings of the 11th International Conference, Polyana, UKRAINE. February 23-25, 2011. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2011. – P. 71-73.

34. Гаркуша С. В. Двухиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / С.В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : 15-й юбилейный международный молодежный форум, Харьков, 18–20 апреля 2011 г. Т.4 : тезисы докл. – Х. : ХНУРЭ, 2011. – С. 27–28.

35. Лемешко О. В. Оптимізаційна двоіндексна модель структурної самоорганізації багатоканальних MESH-мереж стандарту IEEE 802.11 / О.В. Лемешко, С.В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Проблеми телекомунікацій : п'ята міжнародна науково-технічна конференція, Київ, 19-22 квітня 2011 р. : тези доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – С. 49.

36. Лемешко А. В. Модель распределения частотных каналов в многоканальных MESH-сетях стандарта IEEE 802.11 / А. В. Лемешко, С. В. Гаркуша // Наука и социальные проблемы общества: информатизация и информационные технологии : VI-я международная научно-практическая конференция, Харьков, 24-25 мая 2011 г. : тезисы докл. – Х. : ХНУРЭ, 2011. – С. 361–362.

37. Гаркуша С. В. Двухиндексная модель структурной оптимизации многоканальных MESH-сетей стандарта IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша, М. А. Гоголева // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2011 : материалы IX международной науч.- техн. конференции, Суздаль, Российская Федерация. 29 июня – 1 июля 2011 г. Т. 1 : тезисы докл. – Владимир : ВлГУ, 2011. – С. 45–48.

38. Поповский В. В. Двухиндексная модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / В. В. Поповский, С. В. Гаркуша, А. Х. Абед // Технологии информатизации и управления : II международная научно-практическая конференция, Гродно, Беларусь. 26-27 апреля 2011 г. : тезисы докл. – Гродно, 2011. – С. 156-159.

39. Гаркуша С. В. Розробка та аналіз двохіндексної моделі розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення : VI-й науково-практичний семінар, Київ, 20 жовтня 2011 р. : тези доп. – К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2011. – С. 76.

40. Лемешко О. В. Результаты анализа двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях IEEE 802.11 / О. В. Лемешко, С.В. Гаркуша, Д.В. Агеев // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2011-Livadia) : VII міжнародна науково-технічна конференція, Лівадія, Україна. 10–14 жовтня 2011 р. : тези доп. – К. : ДУІКТ, 2011. – С. 62–64.

41. Гаркуша С. В. Класифікація та аналіз методів розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах / С. В. Гаркуша // Прикладная радио-электроника. Состояние и перспективы развития : труды 4-го международного радиоэлектронного форума : междунар. конф., Харьков, Украина. 18–21 октября 2011 г. Т. 2 : тезисы докл. – Х. : АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 257–260.

42. Гаркуша С. В. Огляд та класифікація методів розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011 : матеріали науково-методичної конференції, Львів, 27–30 жовтня 2011 р. : тези доп. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2011. – С. 49–51.

43. Гаркуша С. В. Анализ результатов частотного планирования в mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша // Нові технології в телекомунікаціях : V Міжнародний науково-технічний симпозиум, Київ, 17–21 січня 2012 р. : тези доп. – К. : ДУІКТ, 2012. – С. 116–118.

44. Garkusha S. V. Analysis the Results of Frequency Planning in Mesh Networking Standard IEEE 802.11 / S. V. Garkusha // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XI International Conference (TCSET'2012), Slavske, Ukraine. February 21–24, 2012. – Lviv, 2012. – P. 285–286.

45. Garkusha S. V. Classification and Analysis of Methods of the Distribution Channels in Multichannel Mesh Networks IEEE 802.11 / S. V. Garkusha, M.O.Yevdokymenko // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XI International Conference (TCSET'2012), Slavske, Ukraine, February 21–24, 2012. – Lviv, 2012. – P. 273–274.

46. Lemeshko O. V. Two-index Mathematical Model of channels Distribution in Multichannel Mesh Networks 802.11 / O. V. Lemeshko, S. V. Garkusha, Ahmed H. Abed // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XI International Conference (TCSET'2012), Slavske, Ukraine, February 21–24, 2012. – Lviv, 2012. – P. 279–280.

47. Лемешко А. В. Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / А.В.Лемешко, С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 22-я международная крымская конференция : материалы конференции, Севастополь, Крым, Украина. 10–14 сентября 2012 г. Т. 1 : тезисы докл. – Севастополь, 2012. – С. 273–274.

48. Гаркуша С. В. Разработка и анализ двухиндексной модели частотного планирования в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / С. В. Гаркуша, М. О. Евдокименко // Новітні технології – для захисту повітряного простору : восьма наукова конференція Харківського університету повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 18-19 квітня 2012 р. : тези доп. – Х., 2012. – С. 161.

49. Гаркуша С. В. Результаты разработки моделей розподілу підканалів в мережах стандарту IEEE 802.16 / С. В. Гаркуша // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012 : матеріали науко-

во-методичної конференції, Львів, 1-4 листопада 2012 р. : тези доп. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2012. – С. 76-77.

50. Лемешко О. В. Аналіз результатів частотного планування в мережах стандарту IEEE 802.16 / О. В. Лемешко, С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки : матеріали II міжнародної науково-практичної конференції, Чернівці, Україна. 25–27 жовтня 2012 р. : тези доп. – Чернівці, 2012. – С. 42–43.

51. Гаркуша С. В. Разработка математической модели распределения подканалов в сетях технологии WiMAX / С. В. Гаркуша, Ахмед Х. Абед // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2012-Livadia) : VIII-а міжнародна науково-технічна конференція, Лівадія, Україна. 1–5 жовтня 2012 р. : тези доп. – К.: ДУІКТ, 2012. – С. 66–68.

52. Garkusha S. Slot Allocation Model and Data Burst Scheduling in Downlink WiMAX Technology / S. Garkusha, Ahmed H. Abed // The Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2013) : proc. of 12th International Conference, Polyana, UKRAINE. February 19–23, 2013. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2013. – P. 97–100.

53. Lemeshko O. QoS Ensuring Scheme for Telecommunication Networks with Tail Drop and RED Mechanisms / O. Lemeshko, O. Yevsyeyeva, S. Garkusha // Conference the Experience of Designing and Application of Cad Systems in Microelectronics (CADSM 2013) : proc. of 12th International Conference, Polyana, UKRAINE. February 19–23, 2013. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2013. – P. 214–216.

54. Lemeshko O. Slot Allocation Model and Data Burst Scheduling in Downlink WiMAX Technology / O. Lemeshko, S. Garkusha // Electronics and Nanotechnology : proc. of IEEE XXXIII International Scientific Conference, Kyiv, UKRAINE. April 16–19, 2013. – K.: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 2013. – P. 455–459.

55. Гаркуша С. В. Модель планування пакетів даних в низхідному каналі зв'язку технології WiMAX / С. В. Гаркуша // «IV Січневі ПСи»: інтелектуальна оборона : науково-технічний форум, Львів, 22–24 січня 2013 р. : тези доп. – Львів : Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, 2013. – С. 92–93.

56. Гаркуша С. В. Модель планирования частотно-временного ресурса нисходящего канала связи технологии WiMAX / С. В. Гаркуша // Новітні технології – для захисту повітряного простору : дев'ята наукова конференція Харківського університету повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 17–18 квітня 2013 р. : тези доп. – Х., 2013. – С. 168.

57. Гаркуша С. В. Модель распределения слотов и формирования пакетов данных в технологии WiMAX // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : II Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : материалы конференции, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 26–27 февраля 2013 г. : тезисы докл. – СПб. : СПбГУТ, 2013. – С. 100–104.

58. Гаркуша С. В. Результаты разработки модели распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала связи технологии LTE / С. В. Гаркуша, Ю. А. Василенко // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2013 : материалы X международной научно-технической конференции, Владимир, Российская Федерация. 26–28 июня 2013 г. Т. 1 : тезисы докл. – Владимир : ВлГУ, 2013. – С. 76–79.

59. Garkusha S. V. The Model of Time and Frequency Resource Scheduling in Downlink LTE / S.V. Garkusha // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : proceedings, Krasnoyarsk, Russia. September 12–13, 2013. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2013. – P. 1–4.

60. Lemeshko O. V. A Tensor Model of Multipath Routing Based on Multiple QoS Metrics / O. V. Lemeshko, O. Yu. Yevseyeva, S. V. Garkusha // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : proceedings, Krasnoyarsk, Russia. September 12–13, 2013. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2013. – P. 1–4.

61. Гаркуша С. В. Результаты анализа методов распределения частотно-временного ресурса нисходящего канала технологии LTE / С. В. Гаркуша // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 23-я международная крымская конференция : материалы конференции, Севастополь, Крым, Украина. 8–13 сентября 2013 г. Т. 1 : тезисы докл. – Севастополь, 2013. – С. 468–469.

62. Гаркуша С. В. Результаты анализа модели управления трафиком нисходящего канала связи технологии WiMAX в условиях перегрузок / С. В. Гаркуша // Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии : труды первой международной научно-практической конференции, Харьков, 9–11 октября 2013 г. : тезисы докл. – Х. : ХНУРЭ, 2013. – С. 137–140.

63. Lemeshko A. V. Model time-frequency resource allocation WiMAX aimed at improving the electromagnetic compatibility / A. V. Lemeshko, S. V. Garkusha // Antenna Theory and Techniques (ICATT '13) : proceedings of the 2013 IX International Conference on, Odessa, September 16–20, 2013. – Odessa, 2013. – P. 175–177.

64. Гаркуша С. В. Математическая модель обеспечения гарантированного качества обслуживания нисходящего канала связи технологии LTE / С. В. Гаркуша // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє : матеріали третьої міжнар. наук.-пр. конф. молодих вчених, Одеса, 17–18 жовтня 2013 р. Ч. 1 : тези доп. – Одеса : ОНАЗ, 2013. – С. 116–120.

65. Гаркуша С. В. Результати розробки і порівняльного аналізу моделі розподілу блоків планування в нисхідному каналі зв'язку технології LTE / С. В. Гаркуша // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013 : матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції, Львів, 30 жовтня – 2 листопада 2013 р. : тези доп. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2013. – С. 131–134.

66. Гаркуша С. В. Результаты анализа превентивного ограничения скорости передачи технологии WiMAX в условиях перегрузок / С. В. Гаркуша, Ахмед Хассан Абед // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы международной научно-технической конференции

«INTERMATIC-2013», Москва, 2–6 декабря 2013 г. Ч. 5 : тезисы докл. – М. : Энергоатомиздат, 2013. – С. 53–57.

67. Гаркуша С. В. Результаты разработки модели обеспечения требуемой скорости передачи в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша, А. Х. М. Аль-Дулайми, Х. Д. К. Ал-Джанаби // 68-ма наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів : матеріали конф., Одеса, 4–6 грудня 2013 р. Ч. 2 : тези доп. – Одеса, 2013. – С. 12–15.

68. Garkusha S. Model of the Balanced Distribution of Subchannels in the Mesh-Network Using Wimax Technology / S. Garkusha, A. M. K. Al-Dulaimi, H. D. Al-Janabi // Electronics and Nanotechnology : proc. of IEEE XXXIV International Scientific Conference on, Kyiv, UKRAINE. April 15–18, 2014. – K.: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 2014. – P. 421–425.

69. Garkusha S. Result Research Model of Scheduling Block Allocation in Downlink LTE / S. Garkusha, A. Al-Dulaimi, H. Al-Janabi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : proceedings of the XII International Conference (TCSET'2014), Slavske, Ukraine. February 25 – March 1, 2014. – Lviv, 2014. – P. 498–500.

70. Garkusha S. Model of Distribution of Frequency Resource in the WiMAX Mesh-Network / S. Garkusha, H. Al-Janabi, A. Al-Dulaimi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XII International Conference (TCSET'2014), Slavske, Ukraine. February 25 – March 1, 2014. – Lviv, 2014. – P. 507–509.

71. Garkusha S. Model of Transmission Rate Allocation WiMAX with Taking Into Account the Defined Priorities / S. Garkusha, E. M. Al-Azzawi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XII International Conference (TCSET'2014), Slavske, Ukraine. February 25 – March 1, 2014. – Lviv, 2014. – P. 504–506.

72. Garkusha S. Features of Use of Hypergraphs in the Simulation of Multi-Channel Mesh-Networks IEEE 802.11 / S. Garkusha, O. Garkusha, A. H. Abed // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the XII International Conference (TCSET'2014), Slavske, Ukraine. February 25 – March 1, 2014. – Lviv, 2014. – P. 510–512.

73. Гаркуша С. В. Модель планирования частотно-временного ресурса в нисходящем канале связи технологии LTE / С. В. Гаркуша, А. М. Х. Аль-Дулайми, Х. Д. К. Ал-Джанаби // Проблеми телекомунікацій : науково-технічна конференція : тези доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – С. 92–94.

74. Garkusha S. Analysis Results of WIMAX Dowlink Traffic Management Model In Congestion Conditions / S. Garkusha, Yu. Andrushko, O. Lemesko // proc. of World Telecommunications Congress (WTC 2014), Berlin, Germany. Yuni 1–3, 2014. – Berlin, 2014. – P. 1–4.

75. Пат. 95106 Україна, МПК H04B 1/62, H04B 1/713. Спосіб просторово-часової обробки сигналу в системах зв'язку із стрибкоподібною зміною частоти та контрольний приймач для його здійснення / Гаркуша С. В., Марчук А. В.; заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2008 13027 ; заяв. 10.11.2008 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13.

76. Пат. 63267 Україна, МПК H04J 1/00. Спосіб розподілу частотних каналів багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 з урахуванням територіальної розподіленості mesh-станцій / Лемешко А. В., Гоголева М. О., Гаркша С. В., Абед Ахмед Хассан; заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2011 00540 ; заявл. 18.01.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

77. Пат. 71765 Україна, МПК H04J 1/00. Спосіб розподілу частотних каналів в багатоканальній mesh-мережі стандарту IEEE 802.11 для забезпечення їх структурної самоорганізації / Лемешко А. В., Гаркша С. В., Євдокименко М. О.; заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2012 00471 ; заявл. 16.01.2012 ; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

78. Пат. на корисну модель № 84986 Україна, МПК G06G 3/00 (2013.01). Спосіб маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах / Лемешко О. В., Вавенко Т. В., Стерін В. Л., Євсєєва О. Ю., Гаркуша С. В.; заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2013 04667 ; заявл. 15.04.2013 ; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.

АНОТАЦІЯ

Гаркуша С. В. Моделі та методи підвищення продуктивності безпроводових телекомунікаційних систем на основі оптимального розподілу мережних ресурсів. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

Розроблено моделі та методи підвищення продуктивності безпроводових телекомунікаційних систем на основі оптимального розподілу мережних ресурсів. У рамках запропонованих моделей та методів удалося формалізувати та отримати розв’язок основних задач розподілу мережних ресурсів із врахуванням особливостей функціонування різномірних технологій безпроводового зв’язку. По-перше, для багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж стандарту IEEE 802.11 запропоновані моделі та методи оптимального розподілу частотних каналів і потокової маршрутизації, що базуються на використанні гіперграфів та графів Кьоніга. По-друге, у мережах стандарту IEEE 802.16 і технології LTE розроблено моделі оптимального розподілу частотного й частотно-часового ресурсів низхідного каналу зв’язку з дотриманням вимог на необхідну пропускну здатність станцій користувачів. По-третє, за рахунок представлення mesh-мереж стандарту IEEE 802.16 у вигляді гіперграфу та графу Кьоніга запропоновано модель збалансованого розподілу частотного ресурсу між станціями користувачів. По-четверте, удосконалено тензорну модель управління трафіком у безпроводових телекомунікаційних системах із підтримкою якості обслуговування за множиною показників, що враховує можливі втрати пакетів, викликані переповненням буфера черг на маршрутизаторах мережі, та забезпечує тензорну формалізацію умов забезпечення якості обслуговування одночасно за множиною різномірних показників.

Ключові слова: телекомунікаційна система, оптимізаційна модель, розподіл мережних ресурсів, гарантована якість обслуговування, багатошляхова маршрутизація, тензорний аналіз мереж, гіперграфове представлення мережі, кьонігове представлення мережі.

АННОТАЦИЯ

Гаркуша С. В. Модели и методы повышения производительности беспроводных телекоммуникационных систем на основе оптимального распределения сетевых ресурсов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

Диссертация посвящена решению научной проблемы, которая состоит в развитии теории оптимального распределения сетевых ресурсов беспроводных ТКС в условиях их ограниченности путем разработки и усовершенствования средств повышения их производительности на основе использования гиперграфовых и тензорных моделей и методов.

В рамках диссертационной работы проведен анализ, в результате которого установлено, что наибольшего повышения производительности можно добиться путем эффективного управления ресурсами канального и сетевого уровней (частотными, временными, буферными, информационными, вычислительными, трафиком), которые в разных технологиях беспроводной связи организованы по-разному, поэтому принципы управления сетевыми ресурсами значительно отличаются. Это и определило необходимость совершенствования (модернизации) беспроводных ТКС путем разработки моделей и методов повышения их производительности на основе оптимального распределения сетевых ресурсов, с учетом технологических принципов построения, а также теоретических и методологических подходов.

Проведен анализ существующих моделей и методов распределения сетевых ресурсов в беспроводных ТКС стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.16 и технологии LTE, который продемонстрировал возникновение значительных сложностей при обеспечении необходимого уровня производительности и заданного качества обслуживания. Показано, что выход из сложившейся ситуации видится в развитии теории оптимального управления сетевыми ресурсами путем разработки эффективного инструментария в виде соответствующих моделей и методов повышения производительности беспроводных ТКС для адекватной формализации и высокого качества решения общесистемных проблем и отдельных задач управления сетевыми ресурсами.

Разработаны модели и методы повышения производительности беспроводных телекоммуникационных систем на основе оптимального распределения сетевых ресурсов. В рамках предложенных моделей и методов удалось формализовать и получить решение основных задач по распределению сетевых ресурсов с учетом особенностей функционирования разнородных технологий беспроводной связи. Во-первых, для многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11 предложены модели и методы оптимального

распределения частотных каналов и потоковой маршрутизации, базирующиеся на использовании гиперграфов и графов Кенига. Во-вторых, в сетях стандарта IEEE 802.16 и технологии LTE разработаны модели оптимального распределения частотного и частотно-временного ресурсов нисходящего канала связи с удовлетворением требований пользовательских станций по пропускной способности. В-третьих, за счет представления mesh-сетей стандарта IEEE 802.16 в виде гиперграфов и графов Кенига предложена модель сбалансированного распределения частотного ресурса между пользовательскими станциями. В-четвертых, усовершенствована тензорная модель управления трафиком в беспроводных телекоммуникационных системах, которая учитывает возможные потери пакетов, вызванные переполнением буфера очередей на маршрутизаторах сети, и обеспечивает тензорную формализацию условий обеспечения качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей.

В результате экспериментального анализа разработанных моделей и методов, засвидетельствовано достаточный уровень их адекватности и эффективности при решении задач управления сетевыми ресурсами. При этом отмечено, что адекватность моделей и методов во многом определяется адекватным учетом достаточного количества факторов, влияющих на решение поставленных задач, и исходных данных, определенных технологическими особенностями и полученными из практики.

Показано, что предложенные в работе модели и методы распределения сетевых ресурсов могут найти свою непосредственную реализацию в ряде распространенных в настоящее время и перспективных технологий беспроводной связи, ориентированных на предоставление услуг связи гарантированного качества. Это, прежде всего, касается беспроводных технологий, используемых в качестве транспортной платформы (WMN стандарта IEEE 802.11 и 802.16), и технологий, используемых в сетях доступа (WiMAX и LTE).

Ключевые слова: телекоммуникационная система, оптимизационная модель, распределение сетевых ресурсов, гарантированное качество обслуживания, многопутевая маршрутизация, тензорный анализ сетей, гиперграфовое представление сети, кёнигово представление сети.

ABSTRACT

Garkusha S.V. Models and methods for improving productivity of wireless telecommunication systems based on optimal allocation of network resources. – Manuscript. Thesis for Doctor of Technical Sciences degree by speciality 05.12.02 – telecommunication systems and network. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2014.

Models and methods to improve productivity of wireless telecommunication systems based on optimal allocation of network resources were offered. The proposed models and methods allow to formalize and to solve basic problems of network resource allocation taking into account functioning features of heterogeneous wireless technologies. Firstly, models and methods for optimal allocation of frequency channels and flow-based routing in multi-channel multi-interface IEEE 802.11 mesh-network by use of hypergraph and Koenig graph were proposed. Secondly, models

for optimal allocation of frequency and time-frequency resources in downlink within IEEE 802.16 and LTE technologies with guaranteed bandwidth for user stations were developed. Thirdly, by presenting IEEE 802.16 mesh-networks as a hypergraph and König graph a model for balanced allocation of frequency resources among user stations was offered. Fourthly, tensor model for traffic management in wireless telecommunication systems with ensuring Quality of Service (QoS) under multiple metrics was improved. The model takes into account the packet losses caused by overflow of buffer queues on the network routers. It allows obtaining in the analytical form the conditions to provide with required multiple various QoS metrics, namely, the transmission rate, average delay and packet loss probability simultaneously.

Keywords: telecommunication system, optimization model, network resource allocation, guaranteed quality of service, multipath routing, tensor analysis of networks, hypergraph model of the network, König graph model of the network.