

Харківський національний університет радіоелектроніки

Гоголева Марина Олександрівна

УДК 621.391

**МОДЕЛІ ТА МЕТОД РОЗПОДІЛУ КАНАЛІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ
MESH-МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ 802.11**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, доцент **Лемешко Олександр Віталійович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри телекомунікаційних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Сундучков Костянтин Станіславович**, Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж;

кандидат технічних наук, доцент **Макаров Сергій Анатолійович**, Науковий центр Повітряних сил Харківського університету Повітряних сил Міністерства оборони України, начальник науково-дослідного відділу.

Захист відбудеться «__» _____ 2010 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

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

Автореферат розісланий «__» _____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є.В. Дуравкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток технологій безпроводового зв'язку (ТБЗ) багато в чому продиктований їхньою необхідністю на ринку телекомунікацій, особливо з причини широкої підтримки послуг, пов'язаних з мобільністю абонентів. При цьому технології безпроводового зв'язку, традиційно займаючи важливе місце в системах радіодоступу, все більше закріплюються на ниві технологій транспортних радіомереж. Прикладом цього можуть служити mesh-мережі, які функціонують з використанням стандартів серії IEEE 802.11. Mesh-мережі є новим перспективним класом широкосмугових безпроводових мереж, який останнім часом знайшов широке застосування. Одним з головних аспектів їх побудови є принцип самоорганізації архітектури, що забезпечує стійкість мережі при відмові або перевантаженні окремих її елементів і підмереж, масштабування та контроль стану мережі, знижене енергоспоживання.

Однак важливим стримуючим чинником у розвитку mesh-мереж стандарту IEEE 802.11 є їхня невисока (порівняно зі стандартами проводового зв'язку IEEE 802.3) пропускна здатність, що обмежує підтримку сервісів, орієнтованих на передачу мультимедійної інформації – потокового аудіо, відео та ін. В роботі проведено порівняльний аналіз основних способів підвищення продуктивності безпроводових mesh-мереж та встановлено, що поряд з розширенням спектра сигналу, об'єднанням каналів, використанням MIMO-систем тощо є досить перспективним використання в подібних мережах багатоканальних рішень, особливо це стосується випадку, коли довільна mesh-станція оснащена декількома радіоінтерфейсами та одночасно може працювати на декількох каналах, які не перекриваються. Підвищення продуктивності багатоканальної безпроводової mesh-мережі ґрунтується на зниженні кількості станцій, які одночасно працюють на одному й тому самому каналі. Це здійснюється шляхом розподілу каналів між радіоінтерфейсами (PI) mesh-станцій, множина яких у мережі розбивається на домени колізій, а зв'язність mesh-мережі в цілому (доменив колізій між собою) досягається за допомогою mesh-станцій, які одночасно працюють на двох або більше каналах. Виходячи з цього, задача розподілу каналів у багатоканальній mesh-мережі є досить важливою і сприяє підвищенню рівня їх структурної самоорганізації.

Сьогодні відома досить велика кількість методів вирішення задачі розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, основними з яких є Rate-Adaption Channel Algorithm, C-Huacanth, D-Huacanth, CoMTaC. Проте до основних недоліків відомих рішень слід віднести, насамперед, відсутність узгодженості в рішеннях підзадач кластеризації, закріплення радіоінтерфейсів і виділення їм відповідних каналів; а також недостатній облік апаратурних і технологічних особливостей побудови багатоканальних mesh-мереж стандарту 802.11, територіальної розподіленості та активності mesh-станцій.

У зв'язку з цим у роботі сформульована та розв'язана актуальна наукова задача, яка полягає в удосконаленні засобів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 шляхом розробки та вдосконалення відповідних математичних моделей і методів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Крім того, результати дисертаційної роботи використані під час виконання науково-дослідницької роботи № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами», у якій автор виступав співвиконавцем. Отримано патент на корисну модель «Метод розподілу частотних каналів у багатоканальних mesh-мережах» (№49292, номер заявки u 200911144; заяв. 02.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8).

Мета роботи полягає в підвищенні продуктивності та якості обслуговування в багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11.

Задачами дослідження є:

- огляд існуючих та перспективних технологій безпроводового зв'язку, які використовуються в mesh-мережах;
- аналіз способів підвищення продуктивності mesh-мереж;
- аналіз існуючих методів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах та формулювання вимог, що висуваються до перспективних рішень у цій галузі;
- розробка математичних моделей розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, спрямованих на підвищення продуктивності безпроводових мереж;
- розробка ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів в багатоканальних mesh-мережах з метою підвищення масштабованості отриманих рішень;
- аналіз адекватності розроблених математичних моделей і методу, оцінка ефективності та порівняння відомих і запропонованих рішень щодо розподілу каналів у безпроводових mesh-мережах стандарту 802.11;
- розробка комплексу рекомендацій щодо практичного використання запропонованих моделей і методу розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11.

Об'єкт дослідження – процес розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11.

Предмет дослідження – математичні моделі та метод розподілу каналів в багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11.

Методи дослідження. У ході розробки математичних моделей розподілу каналів був використаний апарат дослідження операцій і теорія множин. Під час розробки ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів використані методи оптимізації ієрархічних багаторівневих систем. З метою перевірки адекватності та оцінки ефективності запропонованих рішень використовувалися методи аналітичного та імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. Під час розв'язання поставленої наукової задачі автором були отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано математичну модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, новизна якої полягає у поданні задачі розподілу каналів у вигляді задачі балансування числа mesh-станцій за доменами колізій з урахуванням їх активності та територіальної розподіленості, що дозволило забезпечити більш високу продуктивність багатоканальної mesh-мережі в цілому.

2. Удосконалено математичну модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, новизна якої полягає, по-перше, в декомпозиційному поданні умов-обмежень щодо зв'язності mesh-мережі та ідентичного управління mesh-станціями, які одночасно знаходяться в різних зонах стійкого прийому; по-друге, у використанні критерію, що гарантує мінімізацію увімкнених радіо-інтерфейсів на станціях mesh-мережі з метою підвищення масштабованості отриманих рішень.

3. Вперше запропоновано ієрархічно-координаційний метод розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, заснований на використанні принципу цільової координації, що дозволило оптимізувати розподіл каналів у mesh-мережі та підвищити масштабованість отриманих рішень.

Практичне значення результатів роботи. Запропоновані математичні моделі та метод можуть бути покладені в основу відповідних протокольних рішень під час розв'язання задач розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандартів 802.11a/b/g/n/s. На отримані результати оформлено патент на корисну модель на тему «Метод розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах» (№ 49292 від 02.11.2009) [19]. Запропоновані математичні моделі та метод розподілу каналів використані в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ), зокрема в дисципліні «Управління та маршрутизація в ТКС». Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження та методичною літературою [20].

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем ХНУРЕ. Основні результати роботи належать особисто автору і повністю опубліковані у фаховій літературі [1–20]. У роботах, виконаних у співавторстві, особисто Гоголевій М.О. належать такі наукові результати. В роботі [1] автор обґрунтував необхідність використання динамічних моделей управління та маршрутизації в ТКС; в [4] автором обґрунтовано умову збереження потоку в моделі багатошляхової маршрутизації в телекомунікаційних мережах; у [5] автором розроблено математичну модель розподілу каналів, яка заснована на погодженому розв'язанні задач кластеризації, виділення радіо-інтерфейсів на mesh-станціях та закріплення за ними каналів; у [8] автором запропоновано математичну модель розподілу каналів у мережі з урахуванням активності та територіальної розподілленості mesh-станцій; в [9] автором запропоновано декомпозиційну модель та ієрархічно-координаційний метод розподілу каналів, в основу якого покладено принцип цільової координації.

Апробація результатів дисертації проводилася на дев'яти наукових конференціях і форумах: Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Інформатика та комп'ютерні технології» (м. Донецьк, 2006); III-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та вчених «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2007» (м. Севастополь, 2007); 11-му, 12-му та 14-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (м. Харків, 2007, 2008, 2010); Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів та негаусовських процесів» пам'яті професора Кунченка Ю.П. (м. Черкаси, 2007); II-й міжнарод-

ній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, 2008); Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the X International Conference TCSET'2010 (м. Львів, 2010); III-му Міжнародному науково-технічному симпозіумі «Нові технології в телекомунікаціях» ДУІКТ-КАРПАТИ '2010 (м. Вишків, 2010).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 18 наукових працях, зокрема в 9 наукових статтях [1-9], які опубліковані в наукових збірниках, що входять до переліку фахових видань, затверджених ВАК України. Також результати досліджень апробовані на дев'яти науково-технічних конференціях і форумах [10-18], оформлено патент на корисну модель [19].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 143 сторінки, з них 4 сторінки з рисунками. Список використаних джерел містить 96 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність досліджуваної наукової проблеми, сформульовано наукову задачу та мету досліджень. Визначено наукову новизну та практичне значення отриманих у роботі результатів. Наведено дані про публікації автора за темою дисертації.

У **першому розділі** на підставі аналізу стану та перспектив розвитку безпроводових технологій показано, що важливим напрямком підвищення продуктивності безпроводових mesh-мереж є використання багатоканальних рішень. Встановлено, що у багатоканальних mesh-мережах однією з основних є задача розподілу каналів між радіоінтерфейсами mesh-станцій. Результати аналізу існуючих методів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах дозволили констатувати їх обмежені можливості з точки зору забезпечення узгодженості рішень задач кластеризації, виділення радіоінтерфейсів та закріплення за ними каналів. Показано, що основним напрямком щодо покращення ефективності подібних рішень є перегляд існуючих математичних моделей і методів розподілу каналів у mesh-мережах стандарту 802.11. Сформульовано наукову задачу та здійснено її декомпозиції на окремі задачі дослідження.

У **другому розділі** розроблено математичну модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, в яких mesh-станції можуть знаходитись як в одній зоні стійкого прийому (Transmission Range, TR), так і в різних. У рамках запропонованої моделі передбачаються відомими такі дані: $\{R_i, i = \overline{1, N}\}$ – множина mesh-станцій, де N – загальна їх кількість в мережі; m_j – кількість радіоінтерфейсів на mesh-станції R_j ; K – кількість каналів у mesh-мережі, які не перекриваються. Так, наприклад, у технології IEEE 802.11b/g таких каналів $3 \div 4$, а в технології IEEE 802.11 a – 12 каналів.

З метою урахування територіальної розподіленості mesh-станцій мережі в математичну модель введено поняття матриці зон стійкого прийому або TR-матриці. У роботі $\{G_z, z = \overline{1, Z}\}$ – множина зон стійкого прийому – кластерів, які

утворюють територіально розподілені mesh-станції, де Z – їх загальна кількість у мережі. Причому в рамках даної роботи кластер утворює множина mesh-станцій, що знаходяться в одній зоні стійкого прийому, в рамках якої станції «чують» один одного, тобто можуть обмінюватися даними за допомогою обраної у mesh-мережі технології безпроводового зв'язку. Формально належність тієї або іншої mesh-станції до довільної зони стійкого прийому (кластеру) можна відобразити за допомогою введеної TR-матриці. Матриця є прямокутною, з кількістю рядків, що відповідає кількості зон стійкого прийому (Z), і з кількістю стовпців, яке відповідає загальній кількості mesh-станцій (N) у мережі, тобто

$$D = \|d_{i,j}\|, \quad i = \overline{1, Z}; \quad j = \overline{1, N}, \quad \text{де } d_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-та станція знаходиться у } i\text{-й TR;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

У ході розв'язання задачі розподілу каналів за РІ mesh-станцій мережі необхідно забезпечити розрахунок булевих змінних

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}; \quad k = \overline{1, K}), \quad (1)$$

причому $x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-й РІ } i\text{-ї станції працює на } k\text{-му каналі;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$

Результатом розрахунку змінних (1) є розбивка mesh-мережі в цілому і кожної зони стійкого прийому окремо на зв'язні домени колізій, у межах яких mesh-станції функціонують на одному й тому самому каналі. У зв'язку з цим під час розрахунку змінних (1) необхідно виконати ряд важливих умов-обмежень:

1. Умова включення i -ї mesh-станції в мережі:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \geq m^* \quad (i = \overline{1, N}), \quad (2)$$

де $1 \leq m^* \leq m_i$ – цілочисельний параметр, який характеризує мінімально необхідну кількість включених РІ на довільно обраній mesh-станції;

$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$ – кількість включених РІ на одній станції.

2. Умова виділення j -му РІ i -ї mesh-станції не більше одного каналу:

$$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, m_i}). \quad (3)$$

3. Умова закріплення k -го каналу на i -й станції не більше ніж за одним РІ:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}; \quad k = \overline{1, K}). \quad (4)$$

4. Умова роботи двох станцій між собою не більш ніж на одному каналі:

$$\sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \cdot \sum_{l=1}^{m_s} x_{s,l}^k \right] \leq 1, \quad (\text{для } (i, s)\text{-пари станцій однієї TR, } i, s = \overline{1, N}; \quad i \neq s), \quad (5)$$

яке вводиться для усунення небажаної структурної надлишковості.

5. Умова того, що довільна mesh-станція на включеному на її радіоінтер-

фейсі каналі працює хоча б з однією станцією своєї зони стійкого прийому:

$$x_{ij}^k \leq \sum_{\substack{u \in G_z, r=1 \\ u \neq i}}^{m_r} x_{ur}^k \quad (i \in G_z, z = \overline{1, Z}, j = \overline{1, m_i}, k = \overline{1, K}), \quad (6)$$

де $\sum_{u \in G_z} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ur}^k$ – кількість станцій у зоні G_z , які працюють на k -му каналі.

6. Умова відсутності ефекту «прихованої станції», тобто станція, яка належить одночасно до декількох зон стійкого прийому, не повинна працювати на одному й тому самому каналі зі станціями різних TR:

$$\sum_{j=1}^{m_j} x_{sj}^k \sum_{i \in G_p} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ir}^k = \sum_{j=1}^{m_j} x_{sj}^k \sum_{i \in G_*^s} \sum_{r=1}^{m_r} x_{ir}^k \quad (s = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, G_p \in G_*^s), \quad (7)$$

де G_*^s – множина зон стійкого прийому, до яких належить s -та станція.

7. Умова зв'язності мережі (зв'язності доменів колізій mesh-станцій):

$$p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \geq N + K - 1, \quad (8)$$

виконання якої спільно з умовами (5)-(7) в умовах дефіциту каналів ($K \leq N - 1$) гарантує, що кількість включених радіоінтерфейсів (p) з урахуванням кількості mesh-станцій і підтримуваних у технології безпроводового зв'язку каналів, що не перекриваються, забезпечить зв'язність багатоканальної мережі.

В зв'язку з тим, що продуктивність mesh-мережі безпосередньо залежить від кількості станцій у доменах колізій, доцільно, щоб кількість mesh-станцій в доменах була розподілена рівномірно, тобто мало місце балансування кількості станцій за всіма доменами. З цією метою введені відповідні умови:

8. Умова балансування кількості mesh-станцій за доменами колізій у залежності від територіальної розподіленості, активності станцій та кількості зон стійкого прийому, має декілька інтерпретацій:

8.1. Якщо всі станції знаходяться в одній TR, то умова має вигляд

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (k = \overline{1, K}), \quad (9)$$

де $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$ – кількість mesh-станцій у мережі, що працюють на k -му каналі;

α – верхній динамічно керований поріг числа mesh-станцій у довільно обраному домені колізій багатоканальної mesh-мережі.

8.2. Під час урахування територіальної розподіленості станцій, тобто при знаходженні станцій у різних зонах стійкого прийому, умова має вигляд:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для кожної } (z, k)\text{-пари, } z = \overline{1, Z}; k = \overline{1, K}), \quad (10)$$

де в лівій частині нерівності подана кількість mesh-станцій у z -й TR.

8.3. Важливим фактором при балансуванні числа mesh-станцій за доменами є їх активність, під якою, в даному випадку, розуміється усереднена кількість (коефіцієнт активності), яке характеризує, наприклад, тривалість сеансів та інтенсивність трафіка, що передається. У зв'язку з цим умова балансування mesh-станцій за доменами колізій має такий вигляд:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \beta_i \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для кожної } (z,k)\text{-пари, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}), \quad (11)$$

де β_i – коефіцієнт активності i -ї станції.

8.4. У зв'язку з нерівномірним навантаженням на РІ mesh-станцій та роботи їх за різними напрямками для отримання більш точної формалізації умови (11) рекомендується використовувати нормований коефіцієнт активності mesh-станцій $\frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k}$, який враховує розподіл трафіка i -ї станції за підключеними

радіоінтерфейсами, тобто за суміжними mesh-станціями. Тоді умова має вигляд

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k} \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq \alpha \quad (\text{для кожної } (z,k)\text{-пари, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}). \quad (12)$$

Розрахунок шуканих змінних (1) і параметра α відповідно до умов, формалізованих нерівностями (2)-(12), здійснено в ході розв'язання оптимізаційної задачі з використанням такого критерію

$$\min_{x, \alpha} \alpha. \quad (13)$$

Сформульована задача з точки зору фізики процесів, які відбуваються у багатоканальних мережах, належить до класу задач балансування мережних ресурсів – зваженої кількості mesh-станцій за доменами колізій, а з математичної точки зору – це задача змішаного цілочисельного нелінійного програмування – MINLP (Mixed-Integer NonLinear Programming). В рамках моделі забезпечується узгодженість вирішення задач кластеризації, виділення радіоінтерфейсів і закріплення за ними каналів, а також гарантується відсутність ефекту «прихованої станції». MINLP-задача була розв'язана за допомогою засобів середовища MatLab v.7 (функція «fminconset»).

Третій розділ з метою підвищення масштабованості отриманих рішень присвячено розробці ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, в основу якого покладено декомпозиційне подання математичної моделі, запропонованої у другому розділі. Відповідно до постановки задачі розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах результат її розв'язання можна подати у вигляді такого вектора:

$$\bar{x} = [\bar{x}_1 \ \bar{x}_2 \ \dots \ \bar{x}_z \ \dots \ \bar{x}_Z]^T \quad (14) \quad \text{при} \quad \bar{x}_z = \left[x_{1,1}^1 \ x_{1,1}^2 \ \dots \ x_{i,j}^k \ \dots \ x_{N_z, m_{N_z}}^K \right]^T, \quad (15)$$

де N_z – кількість mesh-станцій у зоні стійкого прийому G_z ; m_{N_z} – кількість радіоінтерфейсів на mesh-станціях у зоні G_z ; \vec{x}_z – вектор, який характеризує порядок розподілу каналів у z -й TR та подається у декомпозиційному вигляді:

$$\vec{x}_z = \begin{bmatrix} \vec{x}'_z \\ \vec{x}''_z \end{bmatrix}. \quad (16)$$

У виразі (16) \vec{x}'_z – вектор розподілу каналів між PI mesh-станцій, що знаходяться тільки в z -й TR; \vec{x}''_z – вектор розподілу каналів між PI mesh-станцій, що знаходяться крім z -ї TR одночасно ще й в інших TR.

З метою забезпечення ідентичного управління каналами станцій, що знаходяться в кількох зонах стійкого прийому, введена умова на взаємодію TR:

$$\vec{x}''_z = \sum_{y=1, y \neq z}^Z C_{zy} \vec{x}''_y \quad (z = \overline{1, Z}). \quad (17)$$

Крім того, здійснено декомпозиційне подання умови зв'язності створюваних доменів колізій mesh-станцій

$$-E_z^t \vec{x}_z \leq \sum_{r=1, r \neq z}^Z E_r^t \vec{x}_r - N - K + 1 \quad (z = \overline{1, Z}), \quad (18)$$

де E_z – вектори розмірності $N_z \times 1$, структура яких обирається так, щоб підсумовування ввімкнених PI станцій, які знаходяться одночасно у декількох TR, здійснювалось лише один раз.

У декомпозиційній моделі умови (2)-(7) залишилися без змін. Як критерій оптимальності отриманих рішень, на відміну від критерію (13) у зв'язку з неможливістю його декомпозиції, обрано мінімум кількості ввімкнених у мережі PI

$$\min_x F \quad \text{при} \quad F = \vec{f}^t \vec{x}. \quad (19)$$

Для ієрархічно-координаційного вирішення задачі розподілу каналів, маючи у своєму розпорядженні модель (1)-(7) та (14)-(19), серед множини mesh-станцій для кожної з TR виділяється станція координатор (TR-координатор), що відповідає за розрахунок вектора (15), а також призначається координатор для mesh-мережі в цілому, завданням якого є координація рішень (14) з метою забезпечення виконання умов (17) та (18). Отже, нульовий рівень ієрархії розподілу каналів у mesh-мережі утворювали самі mesh-станції, перший рівень – TR-координатори, а другий рівень – координатор мережі в цілому.

У відповідності з теорією багаторівневих ієрархічних систем управління ключовою є задача розподілу за рівнями функцій, пов'язаних з мінімізацією виразу (19) за наявності умов-обмежень (17), (18). Для цього цільову функцію (19) було подано в адитивній формі

$$F = \sum_{z=1}^Z \vec{f}_z^t \vec{x}_z, \quad (20)$$

де вектори \vec{f}_z отримувались у ході декомпозиції вектора \vec{f} за аналогією з декомпозицією (14) та (15).

З метою урахування умов (17) та (18) в ході мінімізації функції (20) здійснено перехід до двоїстої задачі з максимізації лагранжіану

$$\min_x F = \max_{\lambda, \mu} L, \quad (21)$$

де з урахуванням обґрунтовано обраного принципу цільової координації

$$L = \sum_{z=1}^Z L_z, \quad L_z = \vec{f}_z^t \vec{x}_z + \vec{\lambda}_z^{*t} \vec{x}_z'' - \sum_{y=1, y \neq z}^Z [\vec{\lambda}_y^{*t} C_{yz}] \vec{x}_z'' + \vec{\mu}_z^{*t} [-E_z^t \vec{x}_z + N + K - 1] - \sum_{r=1, r \neq z}^Z \vec{\mu}_r^{*t} [E_z^t \vec{x}_z], \quad (22)$$

а $\vec{\lambda}$ та $\vec{\mu}$ – вектори множників Лагранжа, значення яких обчислюються на другому рівні ієрархії (рис. 1) та є фіксованими на першому рівні.

Зазначимо, що кожна зі складових L_z є функцією векторів стану, управління, взаємодії підмереж і векторів множників Лагранжа, які належать тільки до z -ї зони стійкого прийому. Отже, задача оптимального розподілу каналів у багатоканальній mesh-мережі в цілому виявилася декомпозиційованою на Z підзадач, кожна з яких може вирішуватися незалежно одна від іншої. Розв'язання оптимізаційних задач (22) обумовлює нижній (декомпозиційний) рівень вирішення оптимізаційної задачі (21).

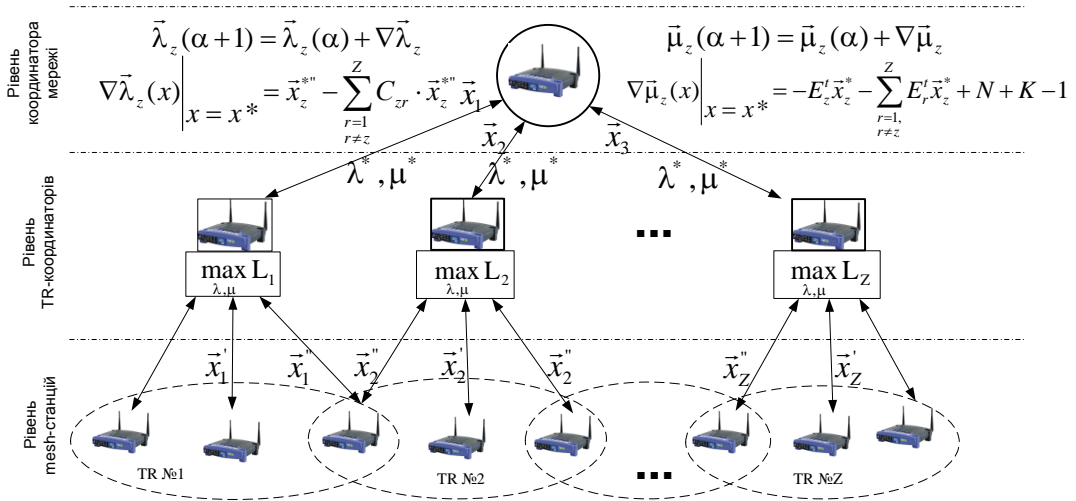


Рис. 1. Обчислювальна структура ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів

На другому рівні (рис. 1), основною задачею якого є координація рішень, отриманих на першому рівні, з метою ідентичного управління mesh-станціями, що знаходяться одночасно у різних TR, здійснюється модифікація вектора множників Лагранжа в ході виконання таких градієнтних процедур:

$$\vec{\lambda}_z(\alpha+1) = \vec{\lambda}_z(\alpha) + \nabla \vec{\lambda}_z, \quad (23) \quad \vec{\mu}_z(\alpha+1) = \vec{\mu}_z(\alpha) + \nabla \vec{\mu}_z, \quad (24)$$

де $\nabla \vec{\lambda}_z$ та $\nabla \vec{\mu}_z$ – градієнт функції, який розраховується виходячи з одержаних на верхньому рівні результатів розв'язання задач розподілу каналів у кожній конкретній z -й TR ($z \in Z$), тобто

$$\nabla \vec{\lambda}_z(x) \Big|_{x=x^*} = \vec{x}_z^{*''} - \sum_{r=1, r \neq z}^Z C_{zr} \cdot \vec{x}_z^{*''}, \quad (25) \quad \nabla \vec{\mu}_z(x) \Big|_{x=x^*} = -E_z^t \vec{x}_z^* - \sum_{r=1, r \neq z}^Z E_r^t \vec{x}_z^* + N + K - 1. \quad (26)$$

Таким чином, з метою підвищення масштабованості отриманих рішень запропонована декомпозиційна модель та ієрархічно-координаційний метод ро-

зподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах. Декомпозиційне подання запропонованої моделі дозволило забезпечити відносну незалежність під час розв'язання задач розподілу каналів за окремими зонами стійкого прийому. Під час використання запропонованих у розділі результатів значно скорочувалась розмірність задачі першого рівня без суттєвого навантаження засобів другого рівня (рис.1). З технологічної точки зору це сприяло мінімізації інерційності управління та об'ємів інформації про стан mesh-мережі, яку необхідно постійно оновлювати в ході оптимізації розподілу каналів, а в підсумку свідчило про підвищення масштабованості отриманих у роботі рішень.

В четвертому розділі було проведено дослідження розроблених моделей та методу розподілу каналів з метою перевірки їх адекватності, оцінки ефективності отриманих за їх допомогою рішень та розробки рекомендацій щодо практичного використання результатів роботи.

Для проведення експериментального дослідження результатів дисертаційної роботи використовувався пакет Network Simulator v.3 (ns3), вибір якого обумовлений тим, що у рамках ns3 надається повне управління каналами, кількістю радіоінтерфейсів, відстанню між станціями та іншими параметрами mesh-мережі, крім цього є можливість генерувати різні види трафіка. Структура імітаційної моделі подана у вигляді взаємопов'язаних блоків (рис. 2), кожен з яких виконує чітко закріплені за ним функції, що в сукупності дозволило оцінити показники якості обслуговування досліджуваних типів mesh-мереж:

- mesh-мережі, які використовують на станціях один канал та один радіоінтерфейс (Single-Radio Single-Channel Wireless Mesh Networks, SR SC WMN);
- багатоканальні mesh-мережі, які використовують на станціях один радіоінтерфейс (Single-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, SR MC WMN);
- багатоканальні mesh-мережі, які використовують на станціях два радіоінтерфейси (Dual-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, DR MC WMN);
- багатоканальні mesh-мережі, які використовують на станціях декілька радіоінтерфейсів (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, MR MC WMN).

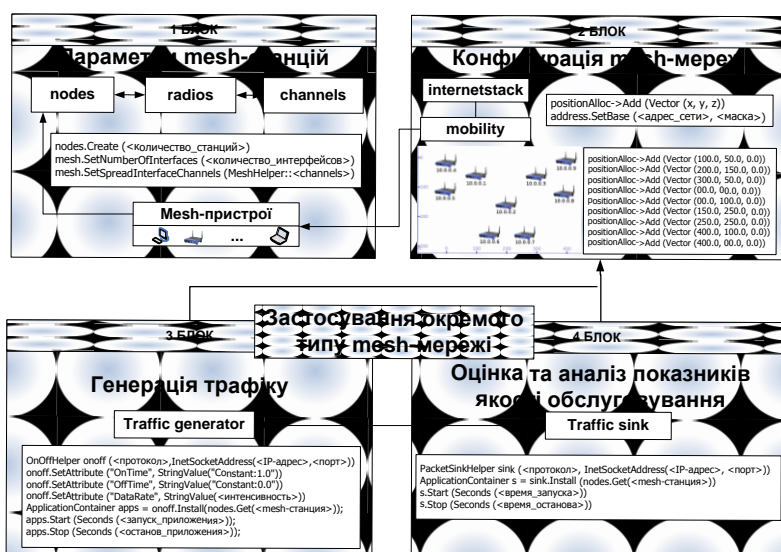


Рис. 2. Структура імітаційної моделі розподілу каналів в багатоканальних mesh-мережах

Під час проведення імітаційного моделювання mesh-мереж різних типів кількість mesh-станцій варіювалося від 5 до 50. Моделювання та дослідження mesh-мереж проводилося шляхом зміни інтенсивності трафіка від 128 Кбіт/с до 3 Мбіт/с з оцінкою значень середньої затримки (рис. 3, а) та джитера (рис. 3, б).

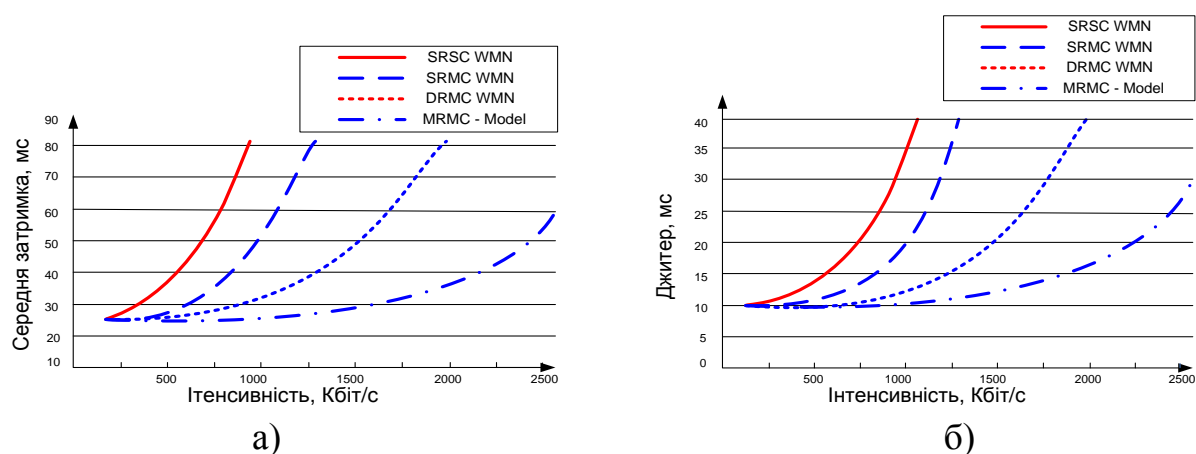


Рис. 3. Аналіз залежності середньої затримки та джитера від інтенсивності трафіка для різних типів mesh-мереж

Результати аналізу свідчать про те, що використання запропонованої моделі (1)–(13) дозволяє підвищити продуктивність мережі (при заданих значеннях середньої затримки та джитера) в середньому в 1.5–1.7 разів порівняно (тип мережі DR MC WMN), та у 2.4–2.7 разів порівняно з рішенням на базі SR MC WMN. Для фіксованої продуктивності мережі використання моделі (1)–(13) призводило до покращення середньої затримки у 1.6–2.3 рази, а джитера в 1.7–2.5 разів порівняно з методом С-Нуасінт.

Крім того, було досліджено вплив на продуктивність mesh-мережі таких факторів, як збільшення кількості mesh-станцій (N) у мережі, нерівномірності територіальної розподіленості (H) та активності (B). Причому територіальний розподіл станцій вважався рівномірним, якщо кількість станцій на обраних ділянках однакової площі (наприклад, 100м×100м або 200м×200м) була однаковою. Нерівномірність оцінювалась як взяте в процентному відношенні відхилення від рівномірного розподілу. Нерівномірність активності розраховувалась також як взяте у процентному відношенні відхилення від середнього значення активності mesh-станцій по мережі.

Згідно з отриманими результатами, зроблено висновки, що реалізація запропонованих у роботі рішень дозволяє підвищити продуктивність mesh-мережі:

- в середньому в 1.1–1.6 разів порівняно з методом CoMTaC, у 1.2–1.7 разів порівняно з методом С-Нуасінт (рис. 4, а) при збільшенні кількості станцій;
- в середньому в 1.4–1.9 разів порівняно з методом CoMTaC, у 1.4–2 рази порівняно з методом С-Нуасінт (рис. 4, б) при зростанні територіальної розподіленості mesh-станцій;
- в середньому в 1.3–1.7 разів порівняно з методом CoMTaC, у 1.3–1.8 разів порівняно з методом С-Нуасінт (рис. 4, в) при варіюванні активності mesh-станцій.

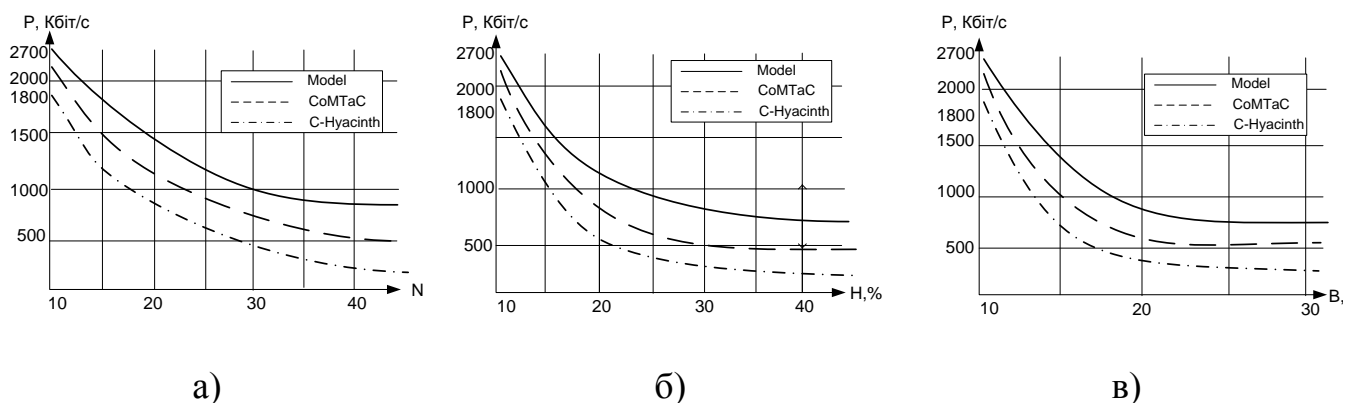


Рис. 4. Результати порівняльного аналізу відомих та запропонованих рішень щодо розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах

Для оцінки ефективності запропонованого ієрархічно-координаційного методу в роботі проведено дослідження збіжності його градієнтних процедур (23)–(26) до оптимального вирішення задачі, пов'язаної з розподілом каналів в багатоканальних mesh-мережах. Кількість ітерацій процедур (23)–(26) розглядалась як функція від кількості доменів колізій і кількості використаних каналів у mesh-мережі (рис. 5, а). Експериментальним шляхом встановлено, що метод збігається до оптимального вирішення в середньому за 4–5 ітерацій. Крім цього, здійснено порівняння за показником продуктивності mesh-мережі відомого розподіленого методу D-Hyacinth, запропонованих у роботі моделі (1)–(13) та ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів (рис. 5, б).

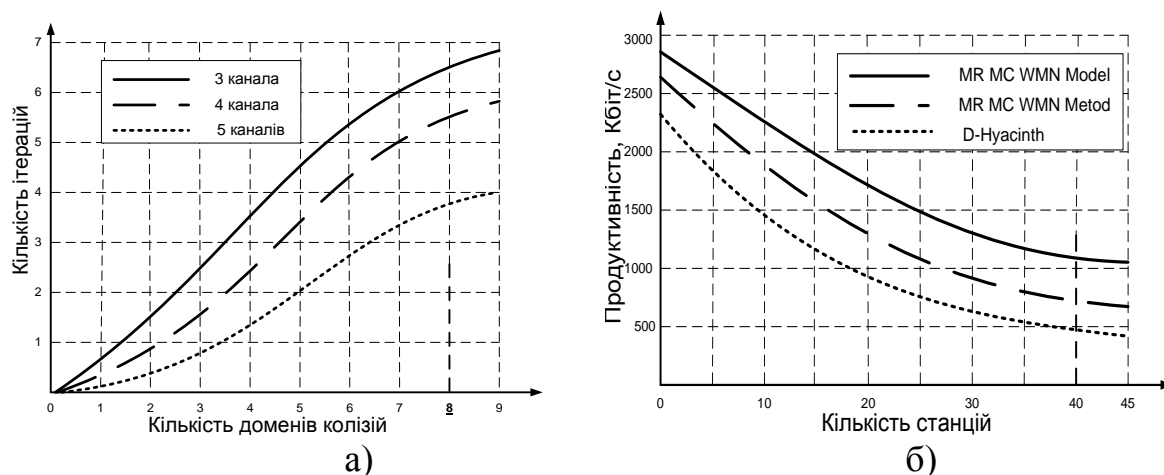


Рис. 5. Результати дослідження ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах

Результати порівняння (рис. 5, б) свідчать про те, що використання запропонованого методу дозволяє підвищити продуктивність mesh-мережі порівняно з методом D-Hyacinth у середньому в 1.5–1.7 разів. При цьому своєрідною «платнею» за масштабованість рішень були втрати продуктивності в середньому на 25–30% порівняно з моделлю централізованого розподілу каналів (1)–(13) mesh-мережі. За результатами досліджень у четвертому розділі наведено рекомендації щодо особливостей практичного використання у багатоканальних mesh-мережах отриманих у роботі рішень.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає в удосконаленні засобів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 шляхом розробки та удосконалення відповідних математичних моделей і методу з метою підвищення продуктивності та якості обслуговування у подібного типу мережах. За підсумками розв'язання поставленої наукової задачі зроблено такі висновки:

1. В роботі показано, що на даному етапі розвитку систем телекомунікацій безпроводові мережі знаходять своє все ширше використання. Проте основним стримуючим фактором їх розвитку є невисока продуктивність. У зв'язку з цим у роботі проаналізовано існуючі способи підвищення продуктивності безпроводових мереж, і як перспективний виділено напрям щодо використання багатоканальних mesh-мереж стандарту IEEE 802.11, який на фоні інших способів (розширення спектра сигналу, об'єднання каналів, використання МІМО-систем тощо) має суттєві переваги. Встановлено, що ефективність багатоканальних mesh-мереж багато в чому визначається якістю використаних моделей і методів розподілу каналів між радіоінтерфейсами mesh-станцій.

2. Внаслідок аналізу існуючих методів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах були визначені їх основні недоліки, в зв'язку з чим сформульовано вимоги до перспективних рішень у цій області:

- забезпечення узгодженого розв'язання задач виділення радіоінтерфейсів на mesh-станціях та закріплення за ними каналів, які не перекриваються;
- урахування технологічних особливостей мережі, які визначають дальність зв'язку, інтенсивність надходження в мережу абонентського трафіка, кількість використовуваних каналів тощо;
- урахування територіальної розподіленості mesh-станцій, їх активності, потужності, кількості підтримуваних mesh-станцією радіоінтерфейсів тощо.

3. На базі сформульованих вимог у роботі запропоновано математичну модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, новизна якої полягає у поданні задачі розподілу каналів у вигляді задачі балансування кількості mesh-станцій за доменами колізій з урахуванням їх територіальної розподіленості та активності, що дозволяє підвищити продуктивність багатоканальної mesh-мережі. Задача балансування кількості mesh-станцій за доменами колізій була сформульована як оптимізаційна задача змішаного цілочисельного нелінійного програмування. Під час розв'язання цієї задачі в ході аналізу відомих методів (метод округлення, гілок і границь, послідовної лінеарізації, штрафних функцій тощо) обґрунтовано обрано метод множників Лагранжа. Кількісний розрахунок за допомогою цього методу з використанням системи MatLab, в рамках якої був задіяний програмний пакет Optimization Toolbox (програма `fminconset`).

4. З метою підвищення масштабованості отриманих рішень вдосконалено математичну модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах шляхом її декомпозиції. Вдосконалення моделі полягало в її доповненні умовою ідентичного управління станціями, що знаходяться одночасно у декількох зонах

стійкого прийому, та декомпозиційним поданням умови зв'язності mesh-мережі. Декомпозиційна модель забезпечила відносну незалежність під час розв'язання задач розподілу каналів за окремими зонами стійкого прийому, що напряму пов'язане з масштабованістю отриманих рішень. Як критерій оптимальності в декомпозиційній моделі обрано мінімум сумарної кількості включених радіоінтерфейсів на mesh-станціях мережі.

5. На базі декомпозиційної моделі розроблено ієрархічно-координаційний метод розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, в основу якого був покладений принцип цільової координації, найбільш відповідний технологічним і обчислювальним особливостям розв'язуваної задачі. Особливістю методу є введення структурної та функціональної ієрархії mesh-станцій. При цьому під час використання запропонованого методу розподілу каналів значно скорочувалась розмірність задачі першого рівня без суттєвого навантаження координаторів другого рівня. З технологічної точки зору це сприяло мінімізації інерційності управління та об'ємів інформації про стан mesh-мережі, яку необхідно постійно оновлювати в ході оптимізації розподілу каналів, а в підсумку свідчило про підвищення масштабованості отриманих у роботі рішень.

6. У дисертації проведено порівняльний аналіз запропонованих та відомих рішень щодо розподілу каналів у mesh-мережах з кількісною оцінкою основних показників якості обслуговування. Аналіз проводився з використанням пакету імітаційного моделювання ns3. В ході порівняльного аналізу встановлено, що використання запропонованої моделі (1)–(13) дозволяє підвищити продуктивність мережі в середньому в 1.5–1.7 разів або покращити середню затримку в 1.6–2.3 рази, а джитера в 1.7–2.5 разів порівняно з методом C-Huacinth. Крім того, реалізація запропонованих у роботі рішень дозволяє підвищити продуктивність mesh-мережі в середньому в 1.2–1.8 разів порівняно з методом CoMTaC, та в 1.3–1.85 разів порівняно з методом C-Huacinth в умовах зростання кількості mesh-станцій, нерівномірності їх територіальної розподіленості та активності.

7. Запропоновано рекомендації щодо практичної реалізації результатів дисертаційної роботи, в основу яких покладені підсумки імітаційного моделювання розроблених моделей і методу розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах. Виконання запропонованих рекомендацій передбачає проведення комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення ефективного функціонування mesh-мереж та стосуються принципів технологічної та алгоритмічно-програмної реалізації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Симоненко Д.В. Результаты количественного анализа динамической модели маршрутизации с различными целевыми функционалами / Д.В. Симоненко, М.А. Гоголева, Е.В. Старкова // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 148. – С. 81-86.

2. Гоголева М.А. Потокково-ориентированная модель многопутевой маршрутизации в mesh-сетях / М.А. Гоголева // Наукові записки УНДІЗ.– 2008. – №4(6). – С. 46-51.

3. Гоголева М.А. Классификация и анализ методов маршрутизации в mesh-сетях / М.А. Гоголева // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 155. – С. 173-185.
4. Лемешко А.В. Поточно-ориентированная модель многопутевой маршрутизации в телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Вісник ДУІКТ. – 2008. – Том 6(2). С. 162-170.
5. Лемешко А.В. Трехиндексная математическая модель распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології» – Київ, 2009. – №54. – С. 94-103.
6. Гоголева М.А. Обзор и классификация методов распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях / М.А. Гоголева // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 159. – С.117-121.
7. Гоголева М.А. Модель балансировки станций с учетом их активности по доменам коллизий в многоканальных mesh-сетях / М.А. Гоголева // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 160. – С.302-306.
8. Лемешко А.В. Модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева, Д.В. Симоненко // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – Харьков, 2009. – Вип. 4(22). – С. 38-41.
9. Лемешко А.В. Иерархическо-координационное распределение частотных каналов в многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11x / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Сборник «Системы управління, навігації та зв'язку». – 2010. – Вип. 1(13) – С. 200-204.
10. Лемешко А.В. Анализ потоковых моделей многопутевой маршрутизации в телекоммуникационных сетях / Д.В. Симоненко, М.А. Гоголева, А.В. Лемешко // Международная студенческая научно-техническая конференция «Информатика и компьютерные технологии». – Донецк: ДонНТУ, 2006. – С. 266-267.
11. Гоголева М.О. Забезпечення гарантованої якості обслуговування в мультисервісних телекомунікаційних мережах / Д.В. Симоненко, М.О. Гоголева, О.Г. Беленков // 3-я Международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и ученых «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007». – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 36.
12. Дробот О.А. Метод обеспечения гарантированного качества обслуживания в территориально-распределенных мультисервисных телекоммуникационных сетях / О.А. Дробот, М.А. Гоголева, С.А. Чепелюк // 11-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – С. 103.
13. Симоненко Д.В. Игровая постановка задачи иерархическо-координационной маршрутизации в ТКС / Д.В. Симоненко, М.А. Гоголева, Е.В. Старкова // Міжнародна науково-практична конференція „Обробка сигналів і негауссівських процесів” пам'яті професора Кунченка Ю.П.: Тези доповідей. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С. 158-160.

14. Гоголева М.А. Модели многопутевой маршрутизации в беспроводных сетях / М.А. Гоголева // Друга міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій”: Збірник тез. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2008. – С.61-63.

15. Гоголева М.А. Модель многопутевой маршрутизации в mesh-сети с динамической балансировкой мощности / М.А. Гоголева // 13-й міжнародний молодіжний форум „Радіоелектроніка і молодь у ХХІ ст.” Зб. матеріалів ХНУРЕ. – Харків: ХНУРЕ, 2009. – С. 145.

16. Gogolieva M. Mathematical model of distribution of frequency channels in multichannel mesh-networks / M. Gogolieva // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the Xth International Conference TCSET'2010. – Lviv-Slavsko: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – С. 31.

17. Гоголева М.А. Модель распределения частотных каналов с учетом территориальной удаленности станций в многоканальных mesh-сетях / С.В. Бабенко, В.Ю. Балашов, М.А. Гоголева // III-й Международный Научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИКТ-КАРПАТЫ. 2010. – С. 60-62.

18. Гоголева М.А. Экспериментальное исследование модели распределения частотных каналов в многоканальных mesh-сетях / М.А. Гоголева, В.Ю. Балашов // 14-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в ХХІ веке»: Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С. 142.

19. Патент 49292 Україна МПК (2009) H04J 1/00. Способ розподілу частотних каналів в багатоканальних mesh-мережах / М.О. Гоголева, О.В. Лемешко; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. u 200911144; заявка 02.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. №8.

20. Андрушко Д.В., Симоненко Д.В., Гоголева М.О. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Управління та маршрутизація в ТКС» для студентів денної форми навчання спеціальності 7.092401 – Телекомунікаційні системи та мережі. – Харків: ХНУРЕ, 2008. – 32с.