

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

## **Пояснювальна записка**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“УДОСКОНАЛЕННЯ БЕЗДРОТОВОДОВОЇ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ АРХІТЕКТУРИ СТАНДАРТУ 802.11”**

Виконав: студент 6 курсу, групи РТДМ-61  
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Андрюк О.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Макаренко А.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2019

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ MESH-МЕРЕЖ.....	13
1.1 Огляд існуючих і перспективних технологій безпроводового зв'язку .....	13
1.2 Класифікація архітектур безпроводових мереж .....	19
1.3 Аналіз способів підвищення продуктивності безпроводових мереж.....	23
1.4 Особливості частотного планування в сучасних безпроводових технологіях стандарту 802.11 .....	27
1.5 Класифікація та аналіз методів розподілу каналів у багатоканальній mesh- мережі .....	30
2 ІЄРАРХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНИЙ РОЗПОДІЛ КАНАЛІВ У БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 .....	35
2.1 Декомпозиційна модель розподілу каналів у багатоканальних mesh- мережах стандарту 802.11 .....	35
2.2 Ієрархічно-координаційний метод розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11 .....	38
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗПОДІЛУ КАНАЛІВ У БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ .....	45
3.1 Обґрунтування структури імітаційної моделі, побудованої на базі пакету Network Simulator .....	45
3.2 Дослідження продуктивності mesh-мереж в залежності від їх типу .....	50
ВИСНОВКИ .....	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	60



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

BPSK (Binary Phase-Shift Keying)	двохпозиційна або двійкова фазова модуляція
ССК (Complementary Code Keying)	кодування за допомогою комплементарних кодів
OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	ортогональне частотне мультиплексування
TR (Transmission Range)	зона стійкого прийому
UWB (Ultrawideband)	радіотехнологія для високошвидкісного зв'язку на малі відстані
WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)	всесвітнє взаємодія мереж для безпроводового доступу в мікрохвильовому діапазоні
WLAN (Wireless Local-Area Network)	безпроводова локальна мережа
WMAN (Wireless Metropolitan-Area Network)	безпроводова міська мережа
WMN (Wireless Mesh Networks)	безпроводові mesh-мережі
WPAN (Wireless Personal-Area Network)	безпроводова персональна мережа
QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)	квадратурна фазова модуляція
БС	базова станція
PI	Радіо інтерфейс
ТБЗ	технологія безпроводового зв'язку

ТКС	телекомунікаційна система
ТФЗК	телефонна мережа загального користування
ЦМІС	цифрова мережа з інтеграцією служб
МЦК	метод розподілу каналів з центральним керуванням
МРК	метод розподілу каналів з розподіленим керуванням
МКК	метод розподілу каналів з комбінованим керуванням

## ВСТУП

**Актуальність теми роботи.** Інтенсивний розвиток технологій безпроводового зв'язку (ТБЗ) багато в чому продиктований їх необхідністю на ринку телекомунікацій, особливо в сфері 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 [1]. 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 і контроль стану мережі, знижене енергоспоживання [2].

Однак важливим стримуючим фактором у розвитку mesh-мереж стандарту IEEE 802.11 є їх 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. У роботі проведено порівняльний аналіз основних способів підвищення продуктивності безпроводових mesh-мереж і встановлено, що поряд з розширенням спектра сигналу, об'єднанням каналів, використанням МІМО-систем і т.д. є досить перспективним використання в подібних мережах багатоканальних рішень [3-5], особливо це стосується випадку, коли довільна mesh-станція оснащена декількома радіо-інтерфейсами і одночасно може працювати на декількох каналах що не перекриваються. Підвищення продуктивності багатоканальної безпроводової mesh-мережі ґрунтується на зниженні кількості станцій, які одночасно працюють на одному і тому ж каналі. Це здійснюється шляхом розподілу каналів між радіоінтерфейсом (PI) mesh-станцій, безліч яких в мережі розбивається на домени колізій, а зв'язність mesh-мережі в цілому (доменів колізій між собою) досягається за допомогою mesh-станцій, які одночасно

працюють на двох або більше каналах. Виходячи з цього, завдання розподілу каналів багатоканальної mesh-мережі є досить важливим і сприяє підвищенню рівня їх структурної самоорганізації.

На сьогоднішній день відома досить велика кількість методів рішення задачі розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах [6-8], основними з яких є Rate-Adaption Channel Algorithm, МЦК, МРК, МКК. Однак до основних недоліків відомих рішень варто 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 віддаленості і активності mesh-станцій.

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

**Мета роботи** полягає в дослідженні методів організації в MESH-мережах для підвищення пропускної здатності ТКС.

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

**Предмет дослідження** - математичні моделі та метод розподілу каналів у багатоканальних mesh - мережах стандарту 802.11.

**Методи дослідження.** У ході розробки математичних моделей розподілу каналів був використаний апарат досліджень операцій і теорія множин. При розробці ієрархічно - координаційного методу розподілу каналів використані методи оптимізації ієрархічних багаторівневих систем. З метою оцінки ефективності функціонування багатоканальної mesh - мережі на базі розроблених моделей і методу розподілу каналів у роботі використовувалися аналітичні та імітаційні методи дослідження.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на ІХ Науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології», Київ: ДУТ, 5 грудня 2019 р.

**Публікації.** Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі “Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку, – 2019, – №3”.

## 1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ MESH-МЕРЕЖ

### 1.1 Огляд існуючих і перспективних технологій безпроводового зв'язку

Технології безпроводового зв'язку все глибше проникають практично в усі сфери життя сучасного суспільств, насамперед, завдяки розширенню переліку послуг, що надаються за допомогою подібного роду технологій. Спільні зусилля розробників мережевого обладнання та організацій по стандартизації в галузі телекомунікацій також спрямовані на активне просування на ринку зв'язку саме безпроводових технологій, зважаючи на цінову доступність та зручність їх використання, особливо за відсутності провідної інфраструктури.

Найбільшою популярністю серед користувачів в даний час користуються ТБЗ стандарту IEEE 802.11 a/b/g/n [1], що обумовлено широкою підтримкою цього стандарту в різноманітних мережевих і термінальних пристроях – настільних і портативних комп'ютерах, комутаторах і маршрутизаторах, точках доступу і т.д. При цьому, залежно від призначення і місця в сучасній телекомунікаційній інфраструктурі, що розвивається в напрямку створення мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN) [2], безпроводові технології можуть виступати як у ролі протокольної бази мереж доступу (Access network) (рис. 1.1), так і в якості системоутворюючої основи для так званих Ad-Hoc і mesh-мереж, станції яких здатні одночасно виконувати функції терміналів, маршрутизаторів і серверів послуг.

Якщо порівнювати провідні та безпроводові мережі, то зважаючи на можливість швидкого розгортання, гнучкої конфігурації мережі, мобільності і т.д. безпроводові мережі мають безперечну перевагу. безпроводова технологія володіє великим ступенем оперативності і для установки безпроводового з'єднання не потрібні трудомісткі і тривалі часові витрати, які пов'язані з прокладанням кабелю і налаштуванням мережі. Зона покриття безпроводової точки доступу коливається від сотні метрів до 30 км при використанні спеціального обладнання [3-5]. Крім того, безпроводову мережу легко розширити,

підключивши до неї додаткові безпроводові пристрої.

Гнучкість конфігурації безпроводових мереж досягається завдяки підтримці таких режимів підключення, як інфраструктура (підключення через точку доступу) і режим незалежної конфігурації «peer-to-peer» (Ad Hoc мережі), що дозволяє підключати нових користувачів і встановлювати нові станції (вузли) мережі в будь-якому місці [6, 7]. Безпроводові мережі можуть бути встановлені для тимчасового використання в приміщеннях, де немає інсталюваної дротяної мережі або якщо прокладка мережевих кабелів ускладнена. Дані фактори викликають зростаючий інтерес до безпроводових технологій, стимулюючи їх розвиток і зниження вартості.

Виходячи з того, що сфера використання безпроводових технологій постійно розширюється, на сьогоднішній день в залежності від області застосування безпроводових мереж і розмірів фізичної зони, зв'язок в якій вони здатні забезпечити, безпроводові мережі поділяються на кілька категорій [7, 8] (табл. 1.1):

- безпроводова персональна мережа (Wireless Personal-Area Network, WPAN);
- безпроводова локальна мережа (Wireless Local-Area Network, WLAN);
- безпроводова міська мережа (Wireless Metropolitan-Area Network, WMAN);
- безпроводова територіально -розподілена (глобальна) мережа (Wireless Wide-Area Network, WWAN).

Основні характеристики безпроводових мереж за моделями застосування та стандартам

Характеристики	Модель застосування	Технології
WPAN	Заміна проводів периферійних пристроїв	Стандарт IEEE 802.15 Bluetooth, UWB, ZigBee
WLAN	Мобільні розширення проводових мереж	Стандарт IEEE 802.11 WI-FI
WMAN	Широкопосмуговий безпроводовий доступ	Стандарти IEEE 802.16, 802.20 WiMAX
WWAN	Мобільний доступ в Інтернет поза приміщеннями	GPRS, WCDMA, EDGE

Якщо розглядати детальніше сучасні безпроводові мережі за своїм призначенням і по радіусу дії, то до персональних мереж відносять системи з радіусом дії від сантиметрів до кількох метрів (до 10-15 м) і з потужністю випромінювання передавачів 1-10 мВт. Найбільш перспективними технологіями стандарту IEEE 802.15 є UWB (Ultrawideband) і ZigBee, які призначені для передачі даних на короткі відстані з високою пропускнуою здатністю (до 480 Мбіт/с) і низькою споживаною потужністю [7, 8].

При порівнянні з персональними мережами, в основу міських безпроводових мереж, заснованих на стандарті IEEE 802.16 (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) [9], покладена телекомунікаційна технологія, розроблена з метою надання універсального безпроводового зв'язку на великих відстанях для широкого спектру пристроїв (від робочих станцій і портативних комп'ютерів до мобільних телефонів).

Взаємно віддалені пристрої на відстань до сотень метрів і потужності передавачів порядку 100 мВт [9], як правило, утворюють локальні мережі, які



базуються на сімействі стандартів 802.11 (табл. 1.2), причому залежно від конкретного стандарту мережі WLAN працюють в діапазоні частот 2, 4 або 5 ГГц, забезпечують швидкість передачі даних в десятки-сотні Мбіт/с і охоплення в радіусі до 200 метрів. Так, при докладному аналізі WLAN, на сьогоднішній день найбільш часто використовуваними є такі стандарти серії 802.11:

- Стандарт IEEE 802.11a, який орієнтований на роботу в діапазоні 5 ГГц з використанням в радіоканалі ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) з різними видами модуляції в підканалах OFDM і з пропускною здатністю до 54 Мбіт/с;

- Стандарт IEEE 802.11b, який на відміну від 802.11a, орієнтований на роботу в діапазоні 2,4 ГГц (2402...2483 МГц) з використанням кодування за допомогою комплементарних кодів (ССК), з використанням двійкової фазової (BPSK) або квадратурної фазової (QPSK) модуляції, залежно від виду якої пропускна здатність може досягати 11 Мбіт/с;

- Стандарт 802.11g, який є розвитком стандарту IEEE 802.11b і також орієнтований на роботу в діапазоні 2,4 ГГц (2402...2483 МГц). У радіоканалі 802.11g використовується ортогональне частотне мультиплексування з різними видами модуляції [7] в підканалах, і пропускна здатність може досягати 54 Мбіт/с.

## Сімейство стандартів 802.11x

Стандарт	Описание
IEEE 802.11	Стандарт, що описує передачу даних в частотному діапазоні 2,4 ГГц, на швидкостях до 2 Мбіт/с. Ратифікований в 1999 р.
IEEE 802.11a	Стандарт, що описує передачу даних в частотному діапазоні 5 ГГц, на швидкостях до 54 Мбіт/с. Ратифікований у 2001 р.
IEEE 802.11b	Стандарт, що описує передачу даних в частотному діапазоні 2,4 ГГц, на швидкостях 5,5 і 11 Мбіт/с. Ратифікований в 1999 р.
IEEE 802.11c	Стандарт, що описує роботу мережевих мостів, включений в IEEE 802.11d ратифікований у 2001 р.
IEEE 802.11d	Стандарт, що описує розширення роумінгу. Ратифікований у 2001 р.
IEEE 802.11e	Стандарт, що описує функції забезпечення якості обслуговування (QoS). Ратифікований в 2005р.
IEEE 802.11f	Стандарт, що описує протокол взаємодії між точками доступу Inter- Access Point Protocol, опублікований в 2003 р., відкликаний в 2006 р.
IEEE 802.11h	Стандарт, що описує зміну використовуваного діапазону частот 5ГГц стандарту 802.11a для сумісності з європейськими вимогами. Ратифікований у 2004 р.
IEEE 802.11i	Стандарт, що описує функції безпеки. Ратифікований у 2004 р.
IEEE 802.11l/x/o/q	Стандарти зарезервовані
IEEE 802.11n	Стандарт, що описує високошвидкісні безпроводові мережі. Підтримувана швидкість до 300 Мбіт/сек. Ратифікований в 2008 р.

## Сімейство стандартів 802.11x

IEEE 802.11p	Стандарт, що описує мобільний доступ пересувних пристроїв (Wireless Access for the Vehicular Environment, WAVE)
IEEE 802.11r	Стандарт, що описує швидкий роумінг, тобто перехід клієнта від однієї зони прийому до іншої.
IEEE 802.11s	Стандарт, що описує mesh-мережі (ESS Mesh)
IEEE 802.11t	Стандарт, що описує управління пропускнуою спроможністю безпроводової мережі (Wireless Performance Prediction, WPP).
IEEE 802.11u	Стандарт, що описує взаємодію з мережами інших стандартів (наприклад, стільникові мережі)
IEEE 802.11v	Стандарт, що описує управління в безпроводовій мережі
IEEE 802.11w	Стандарт, що описує захист керуючих фреймів в безпроводовій мережі.

Стандарт IEEE 802.11n, який був прийнятий для збільшення пропускнуої здатності безпроводової мережі, і з появою якого теоретично пропускна здатність WLAN може досягати 300 Мбіт/с [8], але, як показує практика, варіюється від 150-200 Мбіт/с [10]. Основні характеристики стандартів представлені в табл. 1.3.

Крім класифікації безпроводових мереж по області застосування і розмірів зони покриття існує також класифікація за використання архітектур безпроводових мереж, яка визначає такі показники, як кількість користувачів, завадостійкість, дальність зв'язку, принципи управління в безпроводовій мережі і т.д.

## Основні характеристики стандартів серії 802.11

Параметр	IEEE 802.11a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n
Діапазон частот, ГГц	5,15-5,25 5,725-5,825	2,400 – 2,483	2,400 – 2,483	2,400 – 2,483
Швидкість передачі (максим.), Мбіт/с	54	11	54	300
Швидкість (практ.), Мбіт/с	25	6,5	25	200
Радіус дії, км	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5
Потужність передавач, мВт	40 (2,5 мВт/МГц) (5,15-5,25) 200 (12,5 мВт/МГц) (5,725-5,825) 800 (50 мВт/МГц) (5,725– 5,825)	30 –500	30 –500	30 –500
Методи модуляції сигналу	FHSS, OFDM, 16QAM, 64QAM, BPSK, QPSK	DSSS, BPSK, QPSK	OFDM, 16QAM, 64QAM	OFDM, 16QAM, 64QAM
Відношення сигнал/ шум, дБ	11	11	11	11
Ймовірність помилки	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$
Ширина каналу, МГц	20 (5,15-5,25)	22	22	20, 40

## 1.2 Класифікація архітектур безпроводових мереж

При аналізі безпроводових мереж з точки зору їх архітектури залежно від поставленого завдання (області застосування і ситуації) використовується два варіанти: незалежна конфігурація (Ad-Hoc) і інфраструктурна конфігурація [11, 12]. Відмінності між ними координально впливають на такі показники, як кількість підключаються користувачів, дальність зв'язку, завадостійкість і т. д. Створення мережі в режимі інфраструктури підходить в ситуації, коли до мережі необхідно

підключити досить велику кількість користувачів. Крім того, саме цей режим застосовують для з'єднання двох мереж в одну або підключення точки доступу до маршрутизатора. А основною перевагою створення мереж Ad Hoc є можливість встановлення з'єднання між терміналами звідусіль і в будь-який момент часу.

Крім того, одним з класів безпроводових мереж з використанням незалежної конфігурації є мобільні мережі Ad Hoc MANET (Mobile Ad Hoc NETWORKS), відомі як спеціальні мережі, в яких вузли знаходяться в межах досяжності один одного, і динамічно довільним чином зв'язуються між собою [13,14]. Як правило, в таких мережах відсутнє будь яке централізоване управління, всі вузли є рівноправними і кожен мобільний вузол діє і як хост і як маршрутизатор, беручи участь у відкритті та обслуговуванні маршрутів до інших вузлів. Сформована таким чином мережа, є динамічною мережею, що має непередбачувану топологію, залежну від швидкості пересування мобільних вузлів, що є однією з проблем маршрутизації потоків даних в мережі з урахуванням необхідної якості обслуговування. У результаті аналізу безпроводових мереж з використанням незалежної конфігурації, варто відзначити, що найбільш перспективним класом безпроводових мереж з самоорганізованою архітектурою, є безпроводові mesh-мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) [15-18], які завдяки своїй комірчастій структурі дозволяють маршрутувати дані, голос і команди між вузлами, враховуючи безперервні підключення та зміни конфігурації мережі при виникненні проблем (несправний вузол або заблокований шлях). Mesh-мережі описує стандарт IEEE 802.11s. WMN характеризують як динамічно самоорганізовані і самостійно настроювані мережі з надлишковими mesh -з'єднаннями і самостійним вибором оптимальних каналів.

Проаналізувавши WMN, варто відзначити такі їх переваги:

1. Велика площа і рівномірність радіочастотного покриття, тобто створення зон суцільного інформаційного покриття великої площі.
2. Стійкість мережі до втрати окремих mesh-станцій, тобто здатність мережі швидко самовідновлюватися при втраті окремих mesh -з'єднань.
3. Дешеві і доступні абонентські пристрої. Практично будь-який власник

Wi-Fi-адаптера (ноутбука, смартфона) є потенційним абонентом mesh-мережі.

4. Використання безпроводових транспортних каналів (backhaul) для зв'язку точок доступу в режимі «peer-to-peer».

5. Сумісність і взаємодія з WiMax, Zig-Bee, мережами стільникового зв'язку.

Крім перерахованих переваг, використання mesh-мереж дозволяє mesh-станціям мережі, рівним за статусом, забезпечувати двосторонній зв'язок з іншими станціями в цій мережі й автоматично вибирати оптимальний шлях для проходження пакетів [16, 17]. Така можливість дозволяє ефективно розширювати існуючу інфраструктуру безпроводової мережі, використовувану для спільного доступу, з одночасним збільшенням її можливостей і значно знизити обмеження по пропускній здатності, пов'язані із збільшенням числа підключених mesh-станцій, які притаманні звичайним безпроводовим мережам.

Слід врахувати, що просторове розділення – ще одна перевага мереж комірчастої топології в порівнянні з безпроводовими мережами, в яких всі пристрої спільно використовують одну точку доступу і в яких можуть виникати черги для виходу в радіоефір, що уповільнюють роботу мережі в цілому. На відміну від цього, в мережах комірчастої топології безліч mesh-станцій можуть підключатися одночасно через різні станції. Більш короткі відстані передачі даних в мережах комірчастої топології дозволяють зменшити вплив перешкод і здійснити одночасну передачу просторово розділених потоків інформації. Крім того, mesh-станції залишаються цілком автономними пристроями, здатними самостійно керувати своїм функціонуванням, і в той же час є компонентом загальної мережі, що допускає управління з центральної точки.

Топологія mesh заснована на децентралізованій схемі організації мережі, на відміну від мереж IEEE 802.11a/b/g, які створюються централізованим принципом [19]. Точки доступу, що працюють в mesh-мережах, не тільки надають послуги абонентського доступу, а й виконують функції маршрутизаторів/ретрансляторів для інших точок доступу тієї ж мережі. Завдяки цьому з'являється можливість створення самовста- новлюючого і самовідновлюючого сегмента широкосмугової мережі.

У зв'язку з перерахованими перевагами і широкою сферою застосування використання mesh-мереж є найбільш перспективним напрямком розвитку на ринку безпроводового зв'язку.

Залежно від варіанту архітектури WMN можна класифікувати на три великі групи (рис. 1.2, рис. 1.3):

- Інфраструктурна архітектура WMN [20], в якій здійснюється передача даних на швидкостях в сотні і тисячі Мбіт/с, обслуговуючи інші, менш продуктивні, канали зв'язку (рис. 1.2, а);

- Клієнтська архітектура WMN, яка має на увазі з'єднання mesh-станцій між собою за принципом «peer-to-peer» і є найбільш часто застосованою, з огляду на те, що в цьому типі архітектури mesh-вузли виконують функції і маршрутизатора, і клієнтської mesh-станції (рис. 1.2, б), тобто всі mesh-станції стають вузлами мережі і можуть брати участь в передачі даних, що, природно, робить всю структуру більш гнучкою і продуктивною за рахунок появи додаткових шляхів проходження інформації [21];

- Гібридна архітектура WMN передбачає використання як клієнтського устаткування, так і mesh-маршрутизаторів (рис. 1.2, в) [22]. Mesh-клієнти, в такій архітектурі можуть отримати доступ до мережі через маршрутизатори, а також безпосередньо через інших mesh-клієнтів.

На сьогоднішній день зважаючи на низку переваг, область застосування mesh-мереж досить широка [23]. Mesh-мережі можуть бути розгорнуті як в рамках офісу, корпорації, медичних установах, так і в рамках кампусів і селищ.

Основні області їх представлені на рис. 1.3.

У зв'язку з тим, що mesh-станції можуть виконувати функції маршрутизаторів, хостів і кінцевого обладнання (рис. 1.4), в їх ролі можуть виступати і ноутбук, кишенькові персональні комп'ютери, безпроводові адаптери і т.д.

Але незважаючи на різноманітність безпроводових мереж і безпроводових пристроїв, основним їх недоліком є невисока пропускна здатність. У зв'язку з цим, існує досить обширна класифікація способів підвищення продуктивності

безпроводових мереж, які реалізуються на різних рівнях еталонної моделі взаємозв'язку відкритих систем (EMBOC), однак не всі вони, на жаль, можуть забезпечити необхідну пропускну здатність і якість обслуговування.

### **1.3 Аналіз способів підвищення продуктивності безпроводових мереж**

Як показав аналіз [24], існує ряд способів підвищення продуктивності безпроводових мереж на різних рівнях EMBOC (табл. 1.4).

Використання стандарту 802.11n, в основу якого покладена технологія Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), дозволяє збільшити пропускну здатність теоретично до 300 Мбіт/с. Проте використання даної технології тягне за собою ускладнення антенних систем, що, в свою чергу, призводить до збільшення габаритів пристроїв, збільшення числа передавачів, яке призведе до зменшення часу роботи від батарей портативних пристроїв. Крім того, істотне збільшення продуктивності безпроводових мереж доступно тільки в діапазоні 5 ГГц зважаючи на кількість використовуваних каналів. В цілому, MIMO дає збільшення продуктивності в середньому в 1,5-1,8 разів [26, 27].

2) Розширення спектру сигналу шляхом об'єднання двох 20 МГц каналів в один 40 МГц, робить спектр сигналу більш широкосмуговим, при цьому зберігаючи обмеження на випромінену потужність і дозволяючи збільшити продуктивність безпроводової мережі, так само як і технологія MIMO, в 1,5-1,8 рази [26, 27]. Відповідно до формули Шеннон, мається на увазі, що теоретична межа пропускну здатності каналу зростає прямо пропорційно використовуваній смузі частот (рис. 1.5).

Використання технології інтелектуальних або фазованих антенних решіток [27, 28] завдяки вузькій діаграмі спрямованості дозволяє сфокусувати енергію сигналу в певному напрямку, що збільшує відношення «сигнал/шум» і дозволяє підвищити продуктивність безпроводової мережі в 0,5-0,8 рази. Крім того, при використанні вузького антенного променя зменшуються перешкоди і



підвищується ефективність використання спектра. Також, продуктивність мережі можна підвищити, використовуючи секторні антени. Даний підхід сприяє збільшенню ємності безпроводової мережі в силу того, що, працюючи в стандарті 802.11b і використовуючи три секторні антени на каналах 1, 6, 11 і відповідно три точки доступу, потенційна кількість абонентів в одній і тій же місцевості фактично потроюється [28]. Крім того, секторні антени мають більше посилення, ніж антени з круговою спрямованістю, можуть бути спрямовані в бік обслуговуваних клієнтських станцій і нахилені відносно землі, тим самим, регулюючи зону покриття безпроводової мережі.

Зміна територіального розташування станцій дозволяє домогтися поліпшення видимості станцій, що в свою чергу, забезпечує високий рівень сигналу, тому що при організації безпроводової локальної мережі необхідно враховувати такі особливості навколишнього середовища як рельєф, місцевість і т.д. На якість і дальність зв'язку також впливає безліч фізичних факторів: число стін, перекриттів та інших об'єктів, через які повинен пройти сигнал [27]. У підсумку, при поліпшенні видимості станціями одина одної продуктивність підвищується в 0,5 рази.

Удосконалення методів модуляції і кодування сигналів дозволяє збільшити швидкість передачі [29], а в результаті, і продуктивність мережі в 0,6-0,8 рази. Це пов'язано з тим, що при використанні технології OFDM використовується згортальне кодування з різними пунктурними кодерами, що призводить до різної швидкості згортального кодування. Так, при використанні BPSK-модуляції зі швидкістю згортального кодування 1/2 інформаційна швидкість становитиме 6 Мбіт/с, а при використанні згортального кодування зі швидкістю 3/4-9 Мбіт/с.

Рознесення сигналу по поляризації для зниження впливу багатопроменевих віддзеркалень і перешкод [29, 30] дозволяє зменшити вплив від сусідніх безпроводових мереж завдяки використанню різної поляризації антен (вертикальну, горизонтальну, кругову, корисну для безпроводових мереж усередині офісів і т.д.) і за рахунок цього, підвищити продуктивність безпроводової мережі в 0,7 рази.

Найбільш високого результату при підвищенні продуктивності безпроводової мережі (2-3 рази) можна досягти при використанні багатоканальних mesh-мереж [31, 32], що припускають використання як одного, так і декількох радіоінтерфейсів на кожній mesh-станції, кожен з яких налаштований на окремий канал. Наявність декількох радіоінтерфейсів і розподіл між ними каналів відповідним чином дозволяє:

- Зменшити інтерференцію, яка призводить до серйозного уповільнення роботи з'єднання або навіть до його відмови;
- Збільшити пропускну здатність мережі;
- Знижує затримки при передачі пакетів і ймовірність їх втрати, що особливо важливо для мультимедійного трафіку.

Таким чином, при аналізі існуючих способів підвищення продуктивності безпроводових мереж слід зазначити, що найбільш перспективним напрямком є використання багатоканальних mesh -мереж. Однак їх використання не виключає спільного застосування з іншими способами зважаючи на їх приналежності різним рівням ЕМВОС. У зв'язку з цим, в роботі вибрано напрямок підвищення продуктивності на основі використання багатоканальних mesh -мереж.

Для підвищення продуктивності безпроводової мережі специфікація IEEE 802.11s, визначальна mesh-технологію, рекомендує використовувати кілька каналів і застосовувати пристрої з двома або більше радіоінтерфейсом (рис. 1.6), вирішуючи при цьому завдання оптимального розподілу каналів між радіоінтерфейсом mesh-станцій у мережі. Класифікація mesh-мереж [25] в залежності від кількості використовуваних радіоінтерфесов і каналів mesh-мережі на рис. 1.6.

Mesh-мережі, що використовують два радіоінтерфейси і один канал (Dual-Radio Single-Channel Wireless Mesh Networks, DR SC WMN) (рис. 1.8) [22], в яких один з радіоінтерфейсів застосовується для організації абонентського доступу (2,4 ГГц), а інший, для транспортного каналу (5,8 ГГц). Подібне рішення дозволяє позбутися від шумових перешкод при передачі інформації між точками, що спрощує частотне планування мережі і підвищує продуктивність системи по

транзитному трафіку за рахунок використання транспортного каналу в іншому частотному діапазоні. Устаткування групи DR SC WMN випускають такі виробники як Aruba, BelAir, Cisco, Motorola, Nortel, Proxim, SkyPilot, Tropos та ін.

Багатоканальні mesh-мережі, що використовують один радіоінтерфейс (Single-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, SR MC WMN) (рис. 1.9) [23], дозволяють організувати (так само, як і в рішеннях DR SC WMN) поділ абонентського і транспортного потоків. У даних mesh-мережах використовується один радіоінтерфейс і кілька каналів що не перекриваються, причому кількість каналів залежить від використовуваної технології безпроводового зв'язку. Особливістю даного типу мереж є перемикання одного радіоінтерфейсу з каналу, організуючого абонентський доступ, на транспортний канал, що дозволяє позбавитися шумових перешкод, але, як правило, не дає відчутного підвищення продуктивності [24].

Багатоканальні mesh-мережі, що використовують кілька радіоінтерфейсів (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, MR MC WMN) (рис. 1.10). У таких mesh-мережах використовується декілька радіоінтерфейсів і кілька каналів [22], завдяки чому існує можливість збільшення продуктивності безпроводової мережі в середньому 2-3 рази в порівнянні з SR SC WMN за рахунок зменшення кількості станції, що працюють на одному каналі, позбутися проблеми «прихованої» станції, інтерференційних перешкод і т.д. [23, 24]. Дані переваги зумовлені тим, що за кожним радіоінтерфейсом mesh-станції в мережі даного типу закріплені певний канал, відповідно, всі mesh-станції працюють між собою не на одному каналі, а на кількох.

Таким чином, використання багатоканальних mesh-мереж є найбільш перспективним напрямком при вирішенні завдання підвищення продуктивності безпроводових мереж. Однак для реалізації багатоканальних рішень слід враховувати такі фактори, як вибір використовуваного методу розподілу каналів у mesh-мережі, сумісність mesh-пристроїв з точки зору підтримуваних стандартів, розмірність мережі, а також врахування особливостей частотного планування в безпроводовій мережі.

#### 1.4 Особливості частотного планування в сучасних безпроводових технологіях стандарту 802.11

Аналізуючи особливості частотного планування в серії стандартів 802.11 [1, 7], необхідно відзначити, що в різних країнах з урахуванням ліцензування частот використовується різна кількість каналів. Так, у Сполучених Штатах Америки і Канаді, де в діапазоні 2.4 ГГц доступні канали 1 ÷ 11, для більшості країн Європи для технологій IEEE 802.11b/g доступні канали 1 ÷ 13, а в Японії дозволяється використання всіх 14-ти каналів, але 14 -й канал закріплений тільки за стандартом 802.11 g/n (табл. 1.5).

Для мінімізації створюваних різними станціями взаємних перешкод в стандартах IEEE 802.11a/b/g/n передбачено розподіл діапазону частот на ряд каналів, причому для IEEE 802.11b/g в смузі частот 2.4 ГГц виділені 14 каналів (channel), центральні частоти (center frequency) які призначаються переважно з інтервалом 5 МГц (рис. 1.11).

Таблиця 1.5

Частотне планування стандарту 802.11 b/g

Канал	Частота (GHz)	США і Канада	країни Європи	Японія
1	2,412	так	Так	Так
2	2,417	так	Так	Так
3	2,422	так	Так	Так
4	2,427	так	Так	Так
5	2,432	так	Так	Так
6	2,437	так	так	Так
7	2,442	так	так	Так

8	2,447	так	так	Так
9	2,452	так	так	Так
10	2,457	так	так	Так
11	2,462	так	так	Так
12	2,468	ні	так	Так
13	2,472	ні	так	Так
14	2,484	ні	ні	Тільки 802.11 b

Однак у зв'язку з тим, що ширина одного каналу в технологіях IEEE 802.11 a/b/g становить близько 20-22 МГц, а спектральна маска (рис. 1.12), наприклад, стандарту IEEE 802.11b вимагає, щоб сигнал був ослаблений, по меншій мірі, на 30 дБ від свого піку енергії в 11 МГц від центральної частоти [8]. Таким чином, між центральними частотами каналів, що не перехрещуються, мінімальний інтервал повинен становити не менше 22 МГц.

Канали 1, 6 і 11 вважаються такими, що не перекриваються, оскільки потужність, яка накладається на сусідні канали, занадто мала для істотного погіршення роботи сусідніх каналів. Так це, чи не так – залежить від багатьох факторів, включаючи здатність пристрою придушувати перешкоди від сусіднього каналу і, звичайно, відстань між пристроями, що працюють на різних каналах. Ситуація зі стандартом 802.11g практично аналогічна.

Таким чином, в даному діапазоні частот можна використовувати три частотних канали що не перекриваються. Приміром, перший канал займає частотний діапазон від 2400 до 2423 МГц і центрований щодо частоти 2412 МГц. Другий канал центрований щодо частоти 2417 МГц, а останній, 11 -й канал-щодо частоти 2462 МГц. При такому розгляді 1, 6 і 11 -й канали не перекриваються один з одним і мають 3-мегагерцевий зазор один щодо одного, якщо ж зазор не використовувати, то можна використовувати 4 канали.

У свою чергу, частотний діапазон стандарту 802.11a розбитий на три 100-мегагерцеві піддіапазони [7, 8], що розрізняються обмеженнями по максимальній потужності випромінювання. Нижчий діапазон (від 5,15 до 5,25 ГГц) передбачає потужність всього 50 мВт, середній (від 5,25 до 5,35 ГГц)-250 мВт, а верхній (від 5,725 до 5,825 ГГц)-1 Вт. Використання трьох частотних піддіапазонів із загальною шириною 300 МГц робить стандарт IEEE 802.11a самим широкосмуговим з сімейства стандартів 802.11 і дозволяє розбити весь частотний діапазон на 12 каналів, кожен з яких має ширину 20 МГц, причому вісім з них лежать в 200-мегагерцовому діапазоні від 5,15 до 5,35 ГГц, а решта чотири канали-у 100-мегагерцовому діапазоні від 5,725 до 5,825 ГГц (рис. 1.13). При цьому чотири верхні частотні канали, що передбачають найбільшу потужність передачі, використовуються переважно для передачі сигналів поза приміщеннями.

Оскільки ширина кожного з 12 каналів, що визначаються в стандарті 802.11a має значення 20 МГц, виходить, що кожен ортогональний частотний підканал (що піднесе) має ширину 312,5 кГц. Однак з 64 ортогональних підканалів задіюється тільки 52, причому 48 з них застосовуються для передачі даних (Data Tones), а решта – для передачі службової інформації (Pilot Tones) [12, 13].

Спектральна маска стандарту 802.11a при передачі сигналу представлена на рис. 1.14

У зв'язку з тим, що особливі проблеми при використанні багатоканального режиму викликають перекривання сусідніх каналів одного діапазону, при вирішенні завдань розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, які не перекриваються, зважаючи на поширені в Україні стандарти IEEE 802.11b/g вибирають канали 1, 6, 11 або 1, 5, 9, 13 даних стандартів. Однак, незважаючи на вже наявні три канали, які не перекриваються, виникає завдання у виборі методу розподілу каналів, адже саме використовуваний метод впливає на підвищення продуктивності в багатоканальних mesh-мережах і визначає, наскільки мережа буде функціонувати при відмові окремих станцій, при збільшенні розмірності мережі, наскільки мережа буде наповнена службовою інформацією і т.д.

## 1.5 Класифікація та аналіз методів розподілу каналів у багатоканальній mesh-мережі

Залежно від поставленого завдання з розподілу каналів у багатоканальній mesh-мережі існує обширна класифікація методів розподілу каналів (рис. 1.15). За способом управління виділяють методи з централізованим управлінням, при якому весь контроль за призначенням каналів здійснюється єдиною станцією (наприклад, шлюзом), з децентралізованим управлінням, коли кожна зі станцій приймає рішення про призначення каналів на свої радіоінтерфейси самостійно, а також гібридний метод, при якому за розподіл каналів відповідають всього кілька станцій у mesh-мережі [33, 34].

Методи розподілу каналів можна також класифікувати по тривалості прив'язки до радіоінтерфейсу [34]. При використанні статичного методу розподіл каналів відбувається рідко, при динамічному – часто, і при гібридному – частина каналів розподіляються рідко і частина часто. Одна з переваг даних методів полягає у швидкій реакції на перевантаження або завантаженість mesh-станцій. У випадках зміни топології mesh-мережі використовуються методи розподілу каналів, засновані на швидкості адаптації каналів до зміни мережевої структури та ефективної розсилки про зміни топології. Одними з основних недоліків даних методів є висока тимчасова затримка при повторному розподілі каналів між радіоінтерфейсом mesh-станцій у мережі і збільшення в мережі службової інформації.

Крім того, більшість методів можна розділити на два класи по виду розглянутої топології [35]. У методах з першого класу пропонується будувати деревоподібну топологію мережі, коли кожна станція пов'язана тільки зі своїми нащадками і єдиним батьком. У методах з другого класу все більше станцій розбивається на кластери, усередині яких виділяється станція-лідер. Таким чином, усередині кластера всі станції за винятком лідера рівноправні.

Як приклад більш досконалих підходів розглянемо три методи (МЦК, МРК і МКК) [36, 37]. Один з них (МЦК) є однією з перших спроб використати потенціал

багатоінтерфейсного багатоканального підходу, в той час як два інших з'явилися дещо пізніше, з урахуванням вже накопиченого досвіду. Тому вибір цих методів дозволяє простежити напрямок розвитку в даній області. Крім цього, кожен з даних методів вкладається в одну або більше з описаних вище класифікацій, що дозволяє ще більш чітко усвідомити відмінності механізмів, що відповідають різним категоріям.

*Аналіз централізованого методу розподілу каналів (МЦК).*

Одним з найбільш відомих методів розподілу каналів в мережах IEEE 802.11s є МЦК, що визначає схему розподілу каналів, незалежну від використовуваного алгоритму маршрутизації. Як показали дослідження [35, 36], навіть при використанні всього двох радіоінтерфейсів на кожній з mesh-станцій вдається домогтися збільшення пропускної здатності мережі в 4-6 разів [35] у порівнянні з мережею, в якій всі станції працюють тільки на одному каналі. Даний метод був створений для мереж з переважаючим вертикальним трафіком і описує як централізований, так і розподілений механізми. При механізмі з централізованим управлінням розглядається типова mesh-мережа, в якій кожна зі станцій може одночасно працювати як точка доступу для мобільних пристроїв (ноутбуків, PDA), так і в якості mesh-станції. Кожне з mesh-пристроїв містить в собі кілька радіоінтерфейсів, кожен з яких налаштований на певний канал на відносно довгий час (хвилини, години, дні).

Слід зазначити, що при використанні методу МЦК задача розподілу каналів розбивається на дві підзадачі:

1. Розподіл радіоінтерфейсів між mesh-станціями.
2. Закріплення каналу за кожним з інтерфейсів mesh-станціями.

Крім того, спосіб розподілу каналів [36] з урахуванням навантаження на з'єднання припускає, що кожен вузол має з'єднання з усіма станціями, які перебувають в його області стійкого прийому. Варто зауважити, що алгоритм маршрутизації залежить від пропускної здатності кожного з'єднання, які, в свою чергу, залежать від способу розподілу каналів, а спосіб розподілу каналів залежить від очікуваного навантаження на з'єднання, яка залежить від



маршрутизації. Для дозволу даної залежності спочатку оцінюється очікуване навантаження без врахування пропускної здатності, а потім ітеративно повторюється процес розподілу каналів і маршрутизації до моменту, коли пропускні спроможності кожного із з'єднань будуть максимально близькі до передбачуваного навантаження.

Іншими словами, спочатку при розподілі каналів за допомогою даного методу надходить оцінка навантаження на з'єднання, а виходом є пропускна здатність з'єднань. Алгоритм маршрутизації використовує їх для обчислення шляхів, які використовуються для обчислення очікуваного навантаження. Якщо наприкінці ітерації виявилось, що очікуване навантаження більше пропускної здатності, то процес повторюється і закінчується, якщо подальшого покращення не відбувається.

*Аналіз децентралізованого методу розподілу каналів (D- Hyacinth).*

При аналізі децентралізованого методу розподілу каналів необхідно відзначити, що даний метод має деревоподібну топологію [38, 39], причому корінь кожного з дерев знаходиться в шлюзі, провідному в проводову мережу. Основна проблема даного методу полягає в тому, що якщо прийнято рішення про перерозподіл каналу на одному із з'єднань, то це перерозподіл може торкнутися і сусідні з'єднання (в силу обмеженого числа радіоінтерфейсів). Один з таких випадків зображений на рис. 1.16.

На рис. 1.16 показано, що перерозподіл каналу на з'єднанні AC тягне послідовний перерозподіл каналів на з'єднаннях AB, DF, FH, HJ і для запобігання такої ситуації всі інтерфейси вузла поділяються на два непересічних множника: UP- NICs для спілкування з батьком і DOWN-NICs для спілкування з нащадками. Причому кожен вузол відповідальний за призначення каналів для всіх своїх інтерфейсів з DOWN-NICs [38]. Кожен з інтерфейсів з UP- NICs пов'язаний з єдиним інтерфейсом DOWN-NIC свого батька і йому призначено той канал, що і інтерфейсу батька. Кожна зі станцій спочатку намагається рівномірно розподілити радіоінтерфейси між двома множинами, але для підвищення пропускної здатності інтерфейси можуть бути переведені з одного безлічі в інше.

Кожна зі станцій зберігає інформацію про «альтернативних батьків» для збереження шляху до шлюзу у випадках, коли яка-небудь із станцій виходить з ладу. Якщо у станції немає «альтернативних батьків», вона відсилає пакет FAILURE для того, щоб вже її нащадок знайшов альтернативні шляхи. Такий метод розподілу каналів збільшує пропускну здатність в мережі в 6-7 разів у порівнянні з безпроводовою мережею, що функціонує на одному каналі.

*Аналіз методу розподілу каналів МКК.*

Метод розподілу каналів МКК (Cluster-based Multipath Topology control and Channel assignment scheme) дозволяє використовувати відразу кілька шляхів для передачі даних від однієї станції до іншої. Логічно на кожній із станцій виділяється так званий default-інтерфейс (інтерфейс за замовчуванням). На першому етапі вся мережа розбивається на кластери, потім відбувається розподіл каналів.

Для того щоб зберегти зв'язність мережі, всередині кожного кластера default-інтерфейсу всіх станцій, складових кластера, призначається один з каналів (default-канал). Для міжкластерної взаємодії прикордонні вузли виділяють ще один радіоінтерфейс (їм призначається default-канал сусіднього кластера з найменшим ідентифікатором). Перевагою такого поділу є мінімізація числа станцій, яким необхідно робити розсилку ширококомовних пакетів відразу з декількох інтерфейсів.

Далі йде побудова множинних шляхів між станціями із задіянням non-default-інтерфейсів. Для призначення каналів для non-default-інтерфейсів також необхідно враховувати інтерференцію. Для цього запропоновано використовувати розмір черги станції (більший розмір черги говорить про більшу ступінь інтерференції). Періодично кожна зі станцій передає інформацію про канал і розміри черги лідера кластера. Спочатку відбувається призначення граничних вузлів, потім канали призначаються в порядку віддалення від головного кластера.

Запропонований метод розподілу каналів дозволяє підвищити продуктивність мережі в 2 рази в порівнянні зі схемою МРК [39, 40]. Це пояснюється насамперед використанням множинних шляхів, а також зменшенням

накладних витрат шляхом зменшення числа mesh-станцій, яким необхідно робити ширококомовні розсилання на всі свої радіоінтерфейси.

Результати аналізу недоліків відомих методів розподілу каналів [41, 42] дозволяють зробити висновок про те, що ключове джерело зростання ефективності поставленого завдання в багатоканальній mesh-мережі криється, по-перше, в підвищенні узгодженості рішень приватних завдань кластеризації, закріплення радіоінтерфейсів і виділення їм відповідних каналів, по-друге, в обліку апаратурних і технологічних особливостей побудови багатоканальної mesh-мережі: специфіки використовуваної ТБЗ, тобто числа підтримуваних каналів, можливої дальності зв'язку та реалізованого алгоритму маршрутизації, інтенсивності надходить в мережу абонентського трафіку, тобто «Активності» самих mesh-станцій та кількості радіоінтерфейсів на них. Крім того, методи розподілу каналів, аналіз яких проведений в даному розділі, носять універсальний характер без урахування сценарію використання mesh-мережі, що призводить до високої складності методів. Це, в свою чергу, тягне низьку ефективність при їх реалізації і, в підсумку, викликає необхідність в їх удосконаленні.

## 2 ІЄРАРХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНИЙ РОЗПОДІЛ КАНАЛІВ У БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

### 2.1 Декомпозиційна модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11

Відповідно до постановки завдання розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, наведеної у другому розділі, результат рішення задачі розподілу каналів в цілому можна представити у вигляді наступного вектора [39]:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{x_1} \\ \rho_{x_2} \\ \mathbf{M} \\ \rho_{x_z} \\ \mathbf{M} \\ \rho_{x_z} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

при

$$\rho_{x_z} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^1 \\ x_{1,1}^2 \\ \mathbf{M} \\ x_{i,j}^k \\ \mathbf{M} \\ x_{N_z, m_{N_z}}^K \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

де  $N_z$  – загальне число mesh-станцій в зоні стійкого прийому  $G_z$ ;  $m_{N_z}$  – кількість радіоінтерфейсів на mesh-станціях в зоні  $G_z$ .

Вектор  $\rho_{x_z}$  (2.2) характеризує порядок розподілу каналів в  $z$ -й зоні стійкого прийому і має розмірність  $K \times N_z \times m_{N_z}$ . Для  $z$ -й TR-зони вектор розподілу каналів  $\rho_{x_z}$  також можна уявити в декомпозиційному вигляді:

$$\rho x_z = \begin{bmatrix} \rho \\ x_z \\ \rho' \\ x_z \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де  $\rho x_z$  – вектор розподілу каналів между PI mesh-станцій, кі знаходяться тільки в цій  $z$ -й TR-зоні;  $\rho' x_z$  – вектор розподілу каналів між PI mesh-станцій, знаходяться крім  $z$ -й TR одночасно ще й в інших (інший) TR. Результатом розрахунку вектора (2.3) є порядок розподілу каналів в зоні стійкого прийому mesh-мережі.

З метою забезпечення ідентичного управління ресурсами (каналами зокрема) mesh-станцій, що знаходяться одночасно в кількох зонах стійкого прийому, введемо наступне умова на взаємодію зон стійкого прийому [16]:

$$\rho'' x_z = \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z C_{zy} \rho'' x_y, \quad z = \overline{1, Z}. \quad (2.4)$$

За допомогою даної умови здійснюється узгоджене управління станціями, які можуть забезпечувати зв'язність зон стійкого прийому, як показано на рис. 2.1, б. Так, при не виконанні умови (2.4) кожна з зон стійкого прийому «нав'язує» радіоінтерфейсу mesh-станції канали, використання яких неприпустимо через взаємних перешкод і впливів, зокрема через роботу суміжних mesh-станцій на одному частотному каналі (рис. 2.1, а).

Для забезпечення зв'язності створюваних доменів колізій mesh-станцій використовуємо умову (2.6). Однак з огляду на те, що дана умова має відношення до станції, яка знаходиться в декількох доменах колізій, надалі знадобиться його Декомпозиційне уявлення. Для цього праву частину умови (2.6), яка чисельно характеризує число включених радіоінтерфейсів в mesh-мережі, запишемо у вигляді:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k = \sum_{z=1}^Z E_z^t \rho x_z, \quad (2.5)$$

де  $E_z$  ( $z = \overline{1, Z}$ ) – складаються з нулів і одиниць вектори розмірності  $N_z \times 1$ , структура яких вибирається таким чином, щоб підсумовування включених PI mesh-станцій, що знаходяться одночасно в декількох TR, здійснювалося лише один раз.

Тоді з урахуванням рівності (2.5) умова (2.6) зручно представити в наступному вигляді:  $N_z \times 1$ ,

$$-E_z^t x_z \leq \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t x_r - N - K + 1. \quad (2.6)$$

Для управління mesh-станціями, які перебувають в одній зоні стійкого прийому в Декомпозиційній моделі, як і в моделі, запропонованій в другому розділі, також присутні умови обмеження (2.2)-(2.5) і (2.7)-(2.8). Їх виконання націлене на облік вимог, яким повинні задовольняти перспективні математичні моделі розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах. Умови (2.2)-(2.5) і (2.7)-(2.8) не потребують декомпозиції зважаючи відносини їх до однієї mesh-станції або станціям однієї зони стійкого прийому.

У рамках декомпозиційного представлення моделі розподілу каналів у mesh-мережі виникають деякі труднощі, пов'язані з неможливістю декомпозиції цільової функції (2.13), яка характеризує мінімальний поріг зваженого числа mesh-станцій у створюваних доменах колізій. Основними вимогами при виборі цільової функції є, по-перше, облік фізики процесів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, по-друге, адитивна форма цільової функції, необхідна для проведення подальшої декомпозиції. Тому в якості критерію оптимальності одержуваних рішень в рамках Декомпозиційної моделі виберемо мінімум цільової функції, пов'язаної з мінімізацією зваженої кількості включених в мережі радіоінтерфейсів [17]:

$$\min_x F \text{ при } F = f^t x, \quad (2.7)$$

яка характеризує витрати на частотне планування в mesh-мережі, де вагові

коефіцієнти-координати вектора по суті є параметрами mesh-мережі та окремих станцій, що підлягають періодичному моніторингу або уточненню і, що характеризують, наприклад, відносну вартість (пріоритет) використання радіоінтерфейсів і каналів, активність mesh-станцій;  $[\bullet]$  – операція транспонування матриці (вектора).

Дійсно, чим менше радіоінтерфейсів mesh-станцій включено, тим менше рівень інтерференції, а значить-вища продуктивність mesh-мережі. Варто відзначити, що якщо всі координати вектора дорівнюють одиниці, то завдання зводиться до мінімізації в mesh-мережі числа включених радіоінтерфейсів.

Таким чином, в рамках удосконаленої Декомпозиційної моделі (2.1)-(2.5) і (2.1)-(2.7) також забезпечується узгоджене рішення приватних завдань розподілу каналів у mesh-мережі: кластеризації, виділення РІ і закріплення за ними каналів на mesh-станціях. Крім того, її Декомпозиційне уявлення дозволило забезпечити відносну незалежність при формулюванні і наступному рішенні задач розподілу каналів по окремих зонах стійкого прийому, що прямо пов'язано з масштабністю одержуваних рішень щодо розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту IEEE 802.11.

## **2.2 Ієрархічно-координаційний метод розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах стандарту 802.11**

У ході реалізації ієрархічно-координаційного підходу при вирішенні завдань розподілу каналів у mesh-мережі важливим є етап багаторівневого представлення як структури мережі, так і її функцій з точки зору їх розподілу між рівнями ієрархії, що вводяться. При цьому необхідно дотримуватися основних принципів і постулатів які координовані і сумісність завдань різних рівнів ієрархії [10].

У цьому зв'язку для ієрархічно-координаційного рішення задачі розподілу каналів, розташовуючи моделлю (2.1)-(2.5) і (2.1)-(2.6), серед безлічі

mesh-станцій для кожної з TR виділимо станцію координатор (TR-координатор), що відповідає за розрахунок вектора (2.2), а також призначимо координатор для mesh-мережі в цілому, завданням якого є координація рішень (2.2) з метою забезпечення виконання умов (2.4) і (2.6). Таким чином, нульовий рівень ієрархії розподілу каналів у mesh-мережі утворюють самі mesh-станції, перший рівень-TR-координатори, а другий рівень – координатор мережі в цілому (рис. 2.2).

Головний координатор mesh-мережі являє собою mesh-станцію, на яку покладено функції координації на верхньому рівні і який пов'язаний логічно з усіма TR-координаторами, тобто територіально координатор може перебувати в будь-якій зоні стійкого прийому.

У відповідності з теорією багаторівневих ієрархічних систем [60] ключовою є задача розподілу за рівнями функцій, пов'язаних з мінімізацією виразу (2.7) при наявності умов-обмежень (2.1)-(2.6). Для цього цільову функцію (2.7) представимо в адитивній формі

$$F = \sum_{z=1}^Z f_z^t x_z, \quad (2.8)$$

де вектори  $f_z^t$  характеризують пріоритетність використання радіоінтерфейсів mesh-станцій  $z$ -ї зони стійкого прийому. Ці вектори виходять в ході декомпозиції вектора вагових коефіцієнтів  $f^t$  за аналогією з декомпозицією (2.1) і (2.2).

Оптимізаційна задача пов'язана з мінімізацією виразу (2.8) при наявності умов (2.1)-(2.5) і (2.1)-(2.6) є досить складним багатопараметричним завданням на умовний екстремум. З метою переходу від завдання на умовний екстремум до задачі на безумовний екстремум скористаємося методом множників Лагранжа. Тому з огляду на зміст умов (2.4) і (2.6), в ході мінімізації функції (2.7) перейдемо до двоїстої задачі по максимізації лагранжиана [25]:

$$\min_x F = \max_{\lambda, \mu} L, \quad (2.9)$$



де

$$L = \sum_{z=1}^Z \rho_z^t x_z + \sum_{z=1}^Z \lambda_z^t \left[ x_z - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z C_{zy} x_y \right] + \sum_{z=1}^Z \mu_z^t \left[ -E_z^t x_z - \sum_{\substack{r=1, \\ r \neq z}}^Z E_r^t x_r + N + K - 1 \right], \quad (2.10)$$

де  $\lambda$  і  $\mu$  – вектори множників Лагранжа.

Для вирішення сформульованої оптимізаційної задачі використовуємо принцип цільової координації [17], в рамках якого лагранжіан (2.10) з

урахуванням тотожностей  $\sum_{z=1}^Z \lambda_z^t \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq z}}^Z C_{zy} x_y = \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z \lambda_z^t C_{zy} x_y$  и

$$\sum_{z=1}^Z \mu_z^t \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z E_r^t x_r = \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z \mu_z^t E_r^t x_r.$$

Представимо у вигляді

$$L = \sum_{z=1}^Z \rho_z^t x_z + \sum_{z=1}^Z \lambda_z^t x_z - \sum_{z=1}^Z \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z \lambda_z^t C_{zy} x_y + \sum_{z=1}^Z \mu_z^t \left[ -E_z^t x_z + N + K - 1 \right] - \sum_{\substack{z=1r=1, \\ r \neq z}}^Z \sum_{z=1}^Z \mu_z^t E_r^t x_r. \quad (2.11)$$

Тоді для фіксованих множників Лагранжа ( $\lambda^*$  і  $\mu^*$ ), обчислюваних на другому рівні ієрархії (рис. 2.1), вираз (2.11) може бути представлено у формі:

$$L = \sum_{z=1}^Z L_z, \quad (2.12)$$

$$L_z = f_z^t \mathbf{r}_z + \lambda_z^{*t} \mathbf{r}_z'' - \sum_{\substack{y=1, \\ y \neq z}}^Z [\lambda_y^{*t} C_{yz}] \mathbf{r}_z'' \quad (2.13)$$

Відзначимо, що кожна з складових  $L_z$  є функцією векторів стану, управління, взаємодії підмереж і векторів множників Лагранжа, які відносяться тільки до  $z$ -ї зони стійкого прийому. Таким чином, відповідно до проведених перетворень задача оптимального розподілу каналів у багатоканальній mesh-мережі в цілому виявилася декомпововано на  $Z$  підзадач, кожна з яких може вирішуватися незалежно один від одного. Рішення оптимізаційних задач (2.13) обумовлює нижній (декомпозиційний) рівень вирішення оптимізаційної задачі (2.7).

Особливістю запису (2.13), яка визначає завдання першого рівня ієрархії для кожної TR (рис. 2.2), є те, що всі шукані параметри залежать тільки від індексу  $z$ , що дозволяє вирішувати ці завдання незалежно один від одного, що значно підвищує масштабованість одержуваних рішень.

Крім принципу цільової координації залежно від змісту завдань верхнього рівня можуть використовуватися також принцип прогнозування взаємодій [41] і принцип оцінки взаємодій [16], а також їх всілякі модифікації [27].

Відповідно до принципу прогнозування [18] взаємодій в якості координуючих змінних вже виступають вектори  $\lambda^p$ ,  $\mu$  і  $\mathbf{r}_z''$ , що дещо ускладнює роботу верхнього рівня координації, але розвантажує нижній рівень, тому що мінімізація (2.13) здійснюється лише за змінними. Принцип прогнозування взаємодій володіє значними перевагами тільки у випадку можливості аналітичного рішення задачі верхнього рівня за розрахунком  $\lambda^p$ ,  $\mu$  і  $\mathbf{r}_z''$  при фіксованих значеннях векторної змінної  $\mathbf{r}_z^p$ , розрахованої на нижньому рівні управління [19]. Однак наявність обмежень (2.4) і (2.5) практично виключає отримання аналітичного рішення задачі верхнього рівня.

В рамках принципу оцінки взаємодій [20] на відміну від принципу прогнозування взаємодій на верхньому рівні здійснюється лише визначення

кордонів для варіювання чисельних значень вектора  $x_z^p$  в ході рішення оптимізаційної задачі на нижньому ієрархічному рівні (2.13) по змінним  $x_z^p$  і  $x_z^m$ .

Вибір на роботі принципу цільової координації [38] обумовлений низькою обчислювальною завантаженістю координатора верхнього (координуючого) рівня, за допомогою якого здійснюється лише визначення оптимальних значень  $\lambda$  і  $\mu$  з використанням градієнтних процедур [17] для досягнення мінімуму функціоналу (2.7), а досить трудомісткий розрахунок векторів  $x_z^p$  і  $x_z^m$  здійснюється на нижньому рівні в ході мінімізації виразу (2.13).

На другому рівні (рис. 2.2), основним завданням якого є координація рішень, отриманих на першому рівні з метою ідентичного управління mesh-станціями, які перебувають одночасно в різних TR, здійснюється модифікація вектора множників Лагранжа в ході виконання наступних градієнтних процедур [43]:

$$\lambda_z^k(\alpha + 1) = \lambda_z^k(\alpha) + \nabla \lambda_z^k, \quad (2.14)$$

$$\mu_z^p(\alpha + 1) = \mu_z^p(\alpha) + \nabla \mu_z^p, \quad (2.15)$$

де  $\nabla \lambda_z^k$  і  $\nabla \mu_z^p$  – градієнт функції, який розраховується, виходячи з одержуваних на верхньому рівні результатів рішення задач розподілу каналів у кожній конкретній  $z$ -й TR ( $z \in Z$ ), т.е.

$$\nabla \lambda_z^p(x) \Big|_{x=x^*} = x_z^{p*} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z C_{zr} \cdot x_z^{r*}, \quad (2.16)$$

$$\nabla \mu_z^p(x) \Big|_{x=x^*} = -E_z^t x_z^{p*} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq z}}^Z E_r^t x_z^{r*} + N + K - 1. \quad (2.17)$$

З урахуванням функціональної ієрархії багатоканальної mesh-мережі

обчислювальна структура ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів представлена на рис. 2.2.

Відповідно до розробленого методу координаторами першого рівня (TR-координаторами) здійснюється:

- Збір та обробка інформації про стан належить цій зоні стійкого прийому mesh-станцій. Інформація, що підлягає моніторингу, включає в себе наступні дані: тип використовуваної технології IEEE 802.11 a/b/g/n на mesh-станціях, число на станціях радіоінтерфейсів, завантаженість (активність) станцій і т.д.;

- Визначається порядок розподілу каналів між радіоінтерфейсом mesh-станцій в ввіреній зоні стійкого прийому шляхом максимізації відповідних лагранжіанов, представлених виразом (2.13), і розрахунку векторів  $\lambda_z^0$  ( $z \in Z$ ).

У результаті рішення задачі нижнього рівня кожна зона стійкого прийому розбивається на зв'язкові домени колізій (кількість яких не перевищує кількості каналів, що не перекриваються в підтримувальній технології). З метою забезпечення ідентичного управління та зв'язності доменів колізій рішення, отримані на цьому рівні, підлягають координації з боку координатора мережі в цілому. Основним завданням на верхньому рівні є координація рішень, отриманих на першому рівні з метою забезпечення зв'язності мережі та ідентичного управління mesh-станціями, які перебувають одночасно в різних зонах стійкого прийому.

В результаті координатором мережі на основі результатів, отриманих координаторами окремих зон стійкого прийому, здійснюється модифікація вектора множників Лагранжа в ході виконання градієнтних процедур, представлених виразами (2.14)-(2.15).

Застосування даного методу дозволяє оптимізувати розподіл каналів у багатоканальній mesh-мережі, а за рахунок реалізації ієрархічно-координаційного управління – вдається домогтися високої масштабованості одержуваних рішень, істотно знижується розмірність завдань нижнього рівня з пропорційним зниженням обсягів циркулюючої в мережі службової інформації про її стан, підвищується оперативність у вирішенні завдань розподілу каналів без істотного зниження якості одержуваних рішень.

Як приклад продемонструємо роботу запропонованого методу в рамках наступних вихідних даних (рис. 2.3).

У результаті використання в mesh-мережі ієрархічно-координаційного методу розподілу каналів (рис. 2.4) в кожній зоні стійкого прийому виділялася станція-TR координатор. В даному випадку TR координаторами виступали станції № 2, № 9, № 12. Крім того, в якості головного координатора виділена станція № 1, що належить першій зоні стійкого прийому. Станції-координатори відповідають за розбиття зони стійкого прийому на зв'язкові домени колізій, а головний координатор – за ідентичне управління станціями, що знаходяться одночасно в різних TR.

Таким чином, з метою підвищення масштабованості отриманих рішень запропонована Декомпозиційна модель і ієрархічно-координаційний метод розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах. При використанні запропонованих у розділі рішень значно скорочувалася розмірність завдання першого рівня без істотного навантаження коштів другого рівня. З технологічної точки зору це сприяло мінімізації інерційності управління та обсягів 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.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗПОДІЛУ КАНАЛІВ У БАГАТОКАНАЛЬНИХ MESH-МЕРЕЖАХ

#### 3.1 Обґрунтування структури імітаційної моделі, побудованої на базі пакету Network Simulator

Для дослідження безпроводових mesh-мереж можуть використовуватися кілька спеціалізованих пакетів (табл. 3.1), які здатні з певною точністю моделювати функціонування mesh-мережі в цілому або окремих її процесів. До основних з них відносяться Network Simulator v.2 і v.3, OPNET, Wi-Fi Simulator 802.11, Wi-Fi Mesh Simulator Pro, OMNET. У роботі основними критеріями вибору програмного засобу для імітаційного моделювання були:

- Підтримка mesh-мереж різних типів, таких як Single- Radio Single-Channel WMN, Single- Radio Multi-Channel WMN, Multi- Radio Multi-Channel WMN;
- Можливість управління частотними каналами сімейства стандартів серії 802.11x;
- Підтримка специфікації стандарту 802.11s.

За допомогою програмних комплексів OPNET і OMNET ++ можна моделювати локальні і територіально-розподілені мережі, комп'ютерні системи тощо, але для вирішення завдань розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах ці симулятори не підходять, зважаючи на неможливість опису в них процедури розподілу каналів між радіоінтерфейсом mesh-станцій.

Для дослідження телекомунікаційних систем часто використовується також симулятор дискретних подій Network Simulator v.2 (ns2). Даний симулятор дозволяє здійснювати імітаційне моделювання широкого переліку процесів інформаційного обміну, що протікають в безпроводових мережах, і володіє цілим рядом властивостей, серед яких висока продуктивність і масштабованість, візуалізація результатів і гнучкість налаштування. Однак для моделювання mesh-мереж симулятор ns2 не підходить з тієї ж причини, що і OPNET і OMNET ++.

Характеристика пакетів імітаційного моделювання

Назва/ Функції	OPNET	Wi-Fi Simulator 802.11	Wi-Fi Mesh Simulator Pro	Network Simulator-3
Загальний опис	Потужний мережевий симулятор, що дозволяє будувати великі телекомунікаційні системи, симулювати апаратні програмні платформи та запускати в них програми для кінцевого користувача. Має розвинений графічний інтерфейс.	Симулятор призначений для моделювання безпроводових мереж стандартів 802.11a/b/g і має зручну платформу, з урахунок того, що написаний на мові Java.	Симулятор призначений для моделювання безпроводових mesh-мереж типу Single-Radio Single-Channel WMNs.	Потужний мережевий, дискретно-подієвий мережевий симулятор для Інтернет систем. Дозволяє моделювати mesh-мережі будь-якого типу.
Робота з багатоканальними mesh-мережами	Має вельми обмежені можливості при моделюванні mesh-мереж. Не підтримує стандарт 802.11s.	Не ефективний для моделювання mesh-мереж	Відсутня можливість розподілу каналів.	Надається повне управління частотними каналами, кількістю радіоінтерфейсів, відстанню віддалення однієї станції від іншої.

Для проведення імітаційного моделювання в магістерській роботі використовувався пакет Network Simulator v.3 (ns3). Вибір пакета ns3

обумовлений наявністю необхідної математичної підтримки, що дозволило генерувати різні види трафіку в mesh-мережах. Гнучкість використання ns3 полягала в можливості реалізовувати власні математичні функції зокрема на мові на C++ для дослідження запропонованих моделей і методів розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах. У рамках ns3 також надається повне управління каналами, кількістю радіоінтерфейсів, відстанню між mesh-станціями та іншими параметрами mesh-мережі, а також підтримується можливість моніторингу таких показників якості обслуговування мережі як середня затримка, а джиттер, продуктивність, рівень втрат і т.д.

Для проведення імітаційного моделювання за допомогою пакету ns3 була створена імітаційна модель, структура якої представлена у вигляді взаємопов'язаних блоків (рис. 3.1).

Імітаційна модель за своєю структурою і функціями відповідала вимогам дослідження (рис.1.13) для розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах і надавала такі можливості:

- задання кількості mesh-станцій;
- задання кількості радіоінтерфейсів на mesh-станціях;
- використання декількох каналів;
- позиціонування mesh-станцій в просторі;
- призначення IP- адреси кожної mesh-станції;
- генерація трафіку між зазначеними mesh-станціями;
- завдання інтенсивності генерованого трафіку;
- використання аналізатора трафіку;
- завдання періоду генерування трафіку;

Грунтуючись на поставленому завданні, пов'язаним з розподілом каналів у mesh-мережах, були створені програми, призначені для використання в симуляторі ns3, що описують три типи mesh-мереж: Single- Radio Single-Channel WMN, Single- Radio Multi-Channel WMN, Dual- Radio Multi-Channel WMN. Дані програми дозволили дослідити показники якості обслуговування в наведених типах mesh-мереж і оцінити переваги кожного з них.



Перший блок в структурі імітаційної моделі розподілу каналів містить три основні підблока: «nodes», «radios» і «channels». У підблоків «nodes» задається кількість mesh-станцій, які будуть створені в процесі моделювання, у підблоків «radios»-кількість радіоінтерфейсів на кожній станції, а в підблоків «channels»-кількість використовуваних каналів в mesh-мережі. Дані параметри задаються за допомогою функцій, представлених на рис. 3.2.

Параметр завдання каналів являє собою булеві значення, які задаються або атрибутом ZERO\_CHANNEL, маючим на увазі закріплення за кожним радіоінтерфейсом mesh-станції одного каналу, або атрибутом SPREAD\_CHANNELS, що визначає використання декількох каналів і моделювання mesh-мережі. Структура імітаційної моделі повністю відповідає запропонованій теоретичній моделі розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах на предмет опису в ній умов-обмежень з другого розділу цієї роботи.

Другий блок в структурі імітаційної моделі визначає конфігурацію mesh-мережі, яка описує територіальну віддаленість кожної mesh-станції в мережі і призначення їй IP- адрес (рис. 3.3).

Для обліку територіальної віддаленості mesh-станцій використовувалася функція позиціонування, яка задає значення по трьох осях координат, надаючи, тим самим, можливість розміщення в просторі кожної mesh-станції в мережі. Приклад програмного коду для завдання параметрів позиціонування наведено на рис. 3.3.

Для завдання IP-адрес інтерфейсів станцій використовувалася функція призначення mesh-станціям початкових мережевих адрес і масок підмережі, наприклад 10.0.0.0 або 192.168.1.0 і 255.255.255.0. Далі кожної створеної mesh-станції призначався IP-адреса в автоматичному порядку згідно з алгоритмом симулятора. Приклад візуалізації позиціонування mesh-станцій з призначенням IP-адрес наведено на рис. 3.5.

Завдання IP-адреси інтерфейсів станцій використовувалася функція призначення mesh-станціям початкових мережевих адрес і масок підмережі, Наприклад 10.0.0.0 або 192.168.1.0 и 255.255.255.0. Далі кожній створеній mesh-

станції призначалася IP- адреса в автоматичності порядку згідно з алгоритмом симулятора. Приклад візуалізації позиціонування mesh -станції з призначення IP - адреси наведено на рис. 3.5. mesh-станцій в ході проведення імітаційного моделювання.

Третій блок в структурі імітаційної моделі (рис. 3.1) являє собою набір функцій, що відповідає за генерування трафіку (рис. 3.6) і завдання його характеристик.

У додатку даного блоку вказується:

- Протокол транспортного рівня (ns3:: TcpSocketFactory, ns3:: UdpPacketFactory і т.д.);
- Адреса станції-одержувача трафіку;
- Інтенсивність генерованого трафіку;
- Час запуску програми на виконання і час його зупинки.

Четвертий блок в структурі імітаційної моделі являє собою набір функцій, що відповідають за прийом і аналіз трафіку (рис. 3.7). У даному блоці проводиться аналіз прийнятих пакетів на станції-одержувачі, на яку були відіслані пакети з програми-генератора трафіку.

Для того щоб додаток-одержувач міг приймати трафік від програми - генератор, а він має бути встановлений на відповідній станції і налаштований на аналіз відповідної IP- адреси, порту і протоколу.

У додатку даного блоку задається:

- Тип протоколу, IP -адреса та порт, на який адресується трафік з програми - генератора;
- Адреса станції, на якій буде здійснено аналіз трафіку;
- Час запуску програми на виконання і час його зупинки;
- Завдання загальної тривалості виконання моделі-Simulator:: Stop (Seconds (< тривалість >)).

Завдяки проведеному в четвертому блоці аналізу трафіку і вбудованим утилітам в ході імітаційного моделювання відстежувалися засобами ns3 такі показники якості обслуговування, як середня затримка, життер, втрати пакетів і

т.д. для різних досліджуваних типів mesh-мереж при збільшенні інтенсивності трафіку від 128 кбіт/с до 3 Мбіт/с. У разі перевантаження mesh-мережі, тобто при різкому погіршенні показників середньої затримки і джиттера зростання інтенсивності генерування трафіку припиняється.

### **3.2 Дослідження продуктивності mesh-мереж в залежності від їх типу**

#### *Дослідження mesh-мережі типу Single-Radio Single-Channel.*

Для проведення імітаційного моделювання в пакеті ns3 mesh-мережі типу Single-Radio Single-Channel (SR SC WMN), тобто мережі з використанням одного радіоінтерфейсу і одного каналу, кількість mesh-станцій варіювалася від 5 до 50. Після територіального розподілу mesh-станцій вироблялося автоматичне призначення IP-адрес, настройка програми-генератора трафіку (рис. 3.8) та додатки-аналізатора трафіку (рис. 3.9).

Моделювання mesh-мережі типу SR SC WMN проводилося шляхом зміни інтенсивності генерованого трафіку і оцінкою показників середньої затримки і джиттера (рис. 3.10), значення яких наведені в табл. 3.2, наприклад, при кількості mesh-станцій рівному дев'яти.

Дослідження показників якості обслуговування в SR SC WMN показали, що для потоку з інтенсивністю вже в 1 Мбіт/с спостерігається перевантаження мережі, про що свідчать різке збільшення середньої затримки (687 мс) і джиттера (40 мс). Таким чином, в ході проведення імітаційного моделювання встановлено (табл. 3.2), що продуктивність досліджуваного фрагмента SR SC WMN становила приблизно 768 кбіт/с.

Результати імітаційного моделювання для SR MC WMN

Інтенсивність трафіку	Середня затримка, мс	Джиттер, мс
128 Кбіт/с	26	10
256 Кбіт/с	30	14
512 Кбіт/с	35	16
768 Кбіт/с	37	18
1 Мбіт/с	687	40

*Дослідження mesh-мережі типу Single-Radio Multi-Channel.*

Проведення імітаційного моделювання mesh-мережі з використанням одного радіоінтерфейсу і декількох каналів вимагає змін конфігурації імітаційної моделі Single- Radio Multi-Channel WMN через збільшення кількості використовуваних каналів. У зв'язку з цим в першому блоці (рис. 3.1) у структурі імітаційної моделі активується функція для використання каналів що не перекриваються та їх розподілу між mesh-станціями з включенням режиму роботи mesh-мережі типу Single- Radio Multi-Channel. Моделювання mesh-мережі SR MC, як і SR SC проводилося аналогічним чином-шляхом зміни інтенсивності генерованого трафіку від 128 Кбіт/с до 3 Мбіт/с з оцінкою показників середньої затримки і джиттера.

Результати імітаційного моделювання для mesh-мережі Single- Radio Multi-Channel для потоків 128 Кбіт/с, 256 Кбіт/с, 512 Кбіт/с, 1 Мбіт/с і 1,25 Мбіт/с представлені на рис. 3.11.

Чисельні значення показників середньої затримки і джиттера при моделюванні mesh-мережі з використанням одного радіоінтерфейсу і декількох каналів наведено в табл. 3.3.

Результати дослідження свідчать, що при інтенсивності трафіку 1,25 Мбіт/с в mesh-мережі відбулася перевантаження, про що свідчать показники середньої затримки (607 мс.) і джиттера (38 мс).

*Дослідження mesh-мережі типу Dual-Radio Multi-Channel.*

При моделюванні mesh-мережі з використанням двох радіоінтерфейсів і каналів що не перекриваються для розподілу каналів між радіоінтерфейсом використовувався відомий централізований метод розподілу каналів (МЦК) [36], тобто розподіл каналів в mesh-мереж носило послідовний характер (виділення радіоінтерфейсів на mesh-станціях, закріплення за ними каналів і т.д.).

Для проведення імітаційного моделювання mesh-мережі даного типу були внесені наступні зміни:

- Відключення функції, яка задає перемикання каналів, т.к. в Dual- Radio Multi-Channel WMN, завдяки закріпленню каналів за радіоінтерфейсом, дана процедура не потрібна;

- Установка двох радіоінтерфейсів на кожен mesh-станцію;

- Закріплення каналів за радіоінтерфейсом mesh-станцій (рис. 3.12).

Для прикладу у проведенні моделювання використовувалося дев'ять mesh-станцій з двома радіоінтерфейсами і трьома каналами що не перекриваються, як у випадку використання технології 802.11 b/g. Даним розподілом каналів mesh-мережа розбивається на домени колізій (рис. 3.13), пов'язані між собою станціями, що працюють одночасно на двох каналах. У кожному домені mesh-станція працює на одному загальному каналі.

Результати моделювання mesh-мережі типу DR MC при збільшенні інтенсивності трафіку з відстеженням показників середньої затримки і джиттера представлені на рис. 3.13.

Результати значень середньої затримки і джиттера при моделюванні mesh-мережі з використанням двох радіоінтерфейсів і декількох каналів наведено в табл. 3.3.

Аналізуючи результати моделювання mesh-мережі типу Dual- Radio Multi-Channel варто відзначити, що при збільшенні інтенсивності трафіку до 1,5 Мбіт/с спостерігався плавний ріст показників затримки і джиттер, а а при 1,5 Мбіт/с показники затримки (38 мс) і джиттера (17 мс) в мережі досягають допустимих значень. При збільшенні інтенсивності до 2 Мбіт/с в мережі відбулася

перевантаження, де середня затримка мала значення 345 мс, а джиттер-40 мс. У результаті порівняльного аналізу продуктивності mesh-мереж типів DR MC і DR SC необхідно відзначити, що при використанні DR MC WMN спостерігалось підвищення продуктивності на 0,25 Мбіт/с.

*Дослідження багатоканальної mesh-мережі на базі розробленої моделі розподілу каналів.*

Для оцінки ефективності функціонування багатоканальної mesh-мережі на базі розробленої моделі, тобто mesh-мережі типу Multi- Radio Multi-Channel, при імітаційному моделюванні за основу були взяті основні функції mesh-мережі типу DR MC, за винятком функцій розподілу каналів, які були налаштовані відповідно з моделлю (2.1)-(2.13) на узгоджене рішення таких завдань, як виділення радіоінтерфейсів на mesh-станціях і закріплення за ними каналів. У результаті моделювання mesh-мережі на базі запропонованої моделі розподілу каналів були отримані залежності середньої затримки від інтенсивності трафіку (рис. 3.15).

Таблиця 3.4

Результати імітаційного моделювання для DR MC WMN

Інтенсивність трафіку	Показники затримки, мс	Джиттер, мс
128 кбіт/с	15	7
256 кбіт/с	23	8
512 кбіт/с	26	10
1 Мбіт/с	35	14
1,5 Мбіт/с	38	17
2 Мбіт/с	345	40

Результати усереднених значень середньої затримки і джиттера при моделюванні багатоканальної mesh-мережі на базі розробленої моделі з використанням двох радіоінтерфейсів і декількох каналів наведено в табл. 3.5.

Результат імітаційного моделювання для DR MC WMN на базі розробленої моделі розподілу каналів

Інтенсивність трафіку	Показники затримки, мс	Джиттер, мс
128 кбіт/с	18	6
256 кбіт/с	21	7
512 кбіт/с	24	9
1 Мбіт/с	28	14
2 Мбіт/с	37	18
3 Мбіт/с	340	38

Аналізуючи результати моделювання багатоканальної mesh-мережі типу Multi- Radio Multi-Channel варто відзначити, що при дослідженні функціонування багатоканальної mesh-мережі на базі розробленої моделі розподілу каналів перевантаження сталося при інтенсивності 3 Мбіт/с, що на 20-25% вище, ніж при дослідженні відомого централізованого методу розподілу каналів МЦК. Також при інтенсивностях трафіку до 2 Мбіт/с спостерігалася стабільність показників затримки і джиттера, що свідчить про збільшення продуктивності мережі на базі запропонованої моделі розподілу каналів. Таким чином, при дослідженні різних типів mesh-мереж за допомогою імітаційного моделювання на базі симулятора ns3 встановлено, що використання багатоканальних mesh-мереж типу Multi-Radio Multi-Channel на базі розробленої моделі призводить до значного підвищення продуктивності мережі відносно інших типів mesh-мереж виходячи з показників якості обслуговування.

Результати порівняльного аналізу різних типів mesh-мереж для наочності представлені на одному графіку (рис. 3.16), який відображає залежність середньої затримки для різних значень інтенсивності потоку.

З рис. 3.16 видно, що при моделюванні різних типів mesh-мереж явну перевагу за показниками затримки має багатоканальна mesh-мережа типу MR MC, в основу якої покладена розроблена модель розподілу каналів, що підтверджує

функціональність мережі відносно інших відомих методів розподілу і підвищує продуктивність мережі в середньому в 1,7-2 рази.

Для наочного порівняння різних типів mesh-мереж за показниками джитера на рис.3.17 представлені відповідно його залежності від інтенсивності трафіку.

Результати аналізу свідчать про те, що використання запропонованої моделі дозволяє підвищити продуктивність мережі в середньому в 1.5-1.7 разів порівняно з мережею типу DR MC WMN, і в 2.4-2.7 рази в порівнянні з рішенням на базі SR MC WMN. Для фіксованої продуктивності мережі використання розробленої моделі призвело до поліпшення середньої затримки в 1.6-2.3 рази, а джиттер, а в 1.7-2.5 рази в порівнянні з методом МЦК.

*Результати порівняльного аналізу відомих методів розподілу каналів із запропонованою моделлю.*

У роботі досліджено вплив на продуктивність mesh-мережі таких факторів, як збільшення кількості mesh-станцій ( $N$ ) в мережі, нерівномірності їх територіальної віддаленості ( $H$ ) і активності ( $B$ ).

Результати порівняльного аналізу продуктивності ( $P$ ) багатоканальної mesh-мережі на основі використання відомих методів і запропонованої моделі залежно від кількості mesh-станцій ( $N$ ) представлені на рис. 3.18.

На рис. 3.18 показано, що при збільшенні числа mesh-станцій в багатоканальній mesh-мережі її продуктивність знижується. При цьому при використанні методів МКК і МЦК [34, 40] продуктивність зменшується в середньому на 15 % при збільшенні мережі до 20 mesh-станцій і на 17 % при збільшенні мережі до 40 станцій щодо продуктивності багатоканальної mesh-мережі при використанні розробленої моделі. Причому метод розподілу каналів МКК при збільшенні числа mesh-станцій у мережі покращує продуктивність мережі щодо централізованого методу МЦК в середньому на 18-20% завдяки використанню множинних шляхів, а за рахунок зменшення числа mesh-станцій, яким необхідно робити ширококомовні розсилання на всі свої радіоінтерфейси.



Важливо відзначити, продуктивність мережі, що функціонує на основі запропонованої моделі (2.1)-(2.13), із збільшенням числа mesh-станцій у мережі падає повільніше щодо цих двох методів завдяки тому, що запропонована модель передбачає балансування числа mesh-станцій по доменах колізій та злагоджено вирішує завдання виділення радіоінтерфейсів на mesh-станціях, закріплення за ними каналів при розподілі каналів у mesh-мережі в цілому, запобігаючи виникненню ефекту «прихованої» станції.

У ході досліджень також відслідковувався характер змін продуктивності (P) мережі в залежності від нерівномірності територіальної віддаленості mesh-станцій. Причому територіальна віддаленість станцій вважалася рівномірною, якщо кількість станцій на вибраних ділянках однакової площі (наприклад, 100м × 100м або 200м × 200м) була однаковою (рис. 3.19, а).

Нерівномірність оцінювалася як взяте в процентному відношенні відхилення від рівномірної територіальної віддаленості.

$$H = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{\left| N_i - \frac{N}{K} \right|}{N^*} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де  $N^*$  – нормована кількість станцій на ділянці;

$N$  -кількість станції в мережі;

$K$  - кількість ділянок фіксованої площі в мережі;

$N_i$  – фактична кількість станцій на ділянці.

Наприклад, у випадку, коли  $N=16$  і кількість ділянок дорівнює чотирьом, то  $N^* = 4$ . Таким чином, виходячи з виразу (3.1), нерівномірність територіальної віддаленості для мережі (рис. 3.19, а) дорівнює 0%, а для мережі (рис. 3.19, б)  $H = 37,5\%$ .

## **ВИСНОВКИ**

Сукупність проведених досліджень та розробок в магістерській роботі складають вирішення завдань з дослідження методів розподілу каналів в MESH-мережах для підвищення пропускної здатності систем стандарту IEEE802.11.

За підсумками рішення поставленої наукової задачі зроблено такі висновки:

1. У роботі показано, що на даному етапі розвитку телекомунікаційних систем безпроводові мережі знаходять своє все більш широке використання. Проте основним стримуючим фактором у їх розвитку є невисока продуктивність. У зв'язку з цим у роботі проаналізовано існуючі способи підвищення продуктивності безпроводових мереж і відзначено, що найбільш перспективним напрямком є використання багатоканальних mesh-мереж стандарту IEEE 802.11, який на тлі інших способів (розширення спектра сигналу, об'єднання каналів, використання MIMO-систем і т. п.) має суттєві переваги. Встановлено, що ефективність багатоканальних mesh-мереж багато в чому визначається якістю використаних моделей і методів розподілу каналів між радіоінтерфейсом mesh-станцій.

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

-Забезпечення узгодженого вирішення завдань виділення радіоінтерфейсів на mesh-станціях і закріплення за ними каналів що не перекриваються;

- Облік технологічних особливостей мережі, які визначають дальність зв'язку, інтенсивність надходження в мережу абонентського трафіку, кількість використовуваних каналів і т.п.;

- Облік територіальної віддаленості mesh-станцій, їх активності, потужності, кількості підтримуваних mesh-станцією радіоінтерфейсів т.д.

3. На базі сформульованих вимог у роботі та аналізу науково-технічної літератури запропоновано математичну модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, новизна якої полягає в представленні задачі

розподілу каналів у вигляді задачі балансування кількості mesh-станцій по доменах колізій з урахуванням їх територіальної віддаленості і активності, що дозволяє підвищити продуктивність багатоканальної mesh-мережі. Завдання балансування кількості mesh-станцій по доменах колізій була сформульована як оптимізаційна задача змішаного цілочисельного нелінійного програмування. При вирішенні цього завдання в ході аналізу відомих методів (метод округлення, гілок і меж, послідовної лінеаризації, штрафних функцій і т.д.) обґрунтовано обраний метод множників Лагранжа. Кількісний розрахунок був здійснений 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 вдосконалена математична модель розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах шляхом її декомпозиції. Удосконалення моделі полягала в її доповненні умовою ідентичного управління станціями, що знаходяться одночасно в кількох зонах стійкого прийому і Декомпозиційним поданням умови зв'язності mesh-мережі. Декомпозиційна модель забезпечила відносну незалежність при вирішенні завдань розподілу каналів по окремих зонах стійкого прийому, безпосередньо пов'язана з масштабністю 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- координатний метод розподілу каналів у багатоканальних mesh-мережах, в основу якого було покладено принцип цільової координації, найбільш підходящий за технологічними і обчислювальними особливостями розв'язуваної задачі. Особливістю методу є введення структурної та функціональної ієрархії mesh-станцій. При цьому при використанні запропонованого методу розподілу каналів значно скорочується розмірність завдання першого рівня без істотного навантаження координаторів другого рівня. З технологічної точки зору це сприяло мінімізації інерційності управління та обсягів 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 магістерській роботі проведено порівняльний аналіз запропонованих і відомих рішень щодо розподілу каналів у mesh-мережах з кількісною оцінкою основних показників якості обслуговування. Аналіз проводився з використанням пакету імітаційного моделювання ns3. У ході порівняльного аналізу встановлено, що використання запропонованої моделі (2.1)-(2.13) дозволяє підвищити продуктивність мережі в середньому в 1.5-1.7 рази або поліпшити середню затримку в 1.6-2.3 рази, а джиттера в 1.7-2.5 рази в порівнянні з методом МЦК. Крім того, реалізація запропонованих у роботі рішень дозволяє підвищити продуктивність mesh-мережі в середньому в 1.2-1.8 рази в порівнянні з методом МКК, і в 1.3-1.85 рази в порівнянні з методом МЦК в умовах зростання кількості mesh-станцій, нерівномірності їх територіальної віддаленості і активності.

7. У ході досліджень встановлено, що використання запропонованого в роботі ієрархічно- координатного методу розподілу каналів дозволяє підвищити продуктивність mesh-мережі в порівнянні з методом МРК в середньому в 1.5-1.7 рази. Крім того, в процесі експериментального дослідження з'ясовано, що метод розраховував оптимальне рішення з розподілу каналів у mesh-мережі в середньому за 4-5 ітерацій градієнтних процедур (3.14)-(3.15).

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications, 802.11 – 2019.
2. Рошан П. Aggielou G. Wireless Mesh Networking // G. Agg'elou, B.Eng. – Athens, 2019. – 548 p.
3. Olwal T.O. A multiple-State Based Power Control for Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks/T.O. Olwal, F.O. Aron, B.J. Van Wyk, Y. Hamam, P. Siarry, N. Ntlatlapa // International Journal of Computer Science. – Vol. 4, no. 1. – 2019. – P. 53 – 61.
4. Kaabil F. Channel Allocation and Routing in Wireless Mesh Networks: A survey and qualitative comparison between schemes/F. Kaabil, S. Ghannay, F. Filalil // International journal of Wireless and Mobile Network. – Vol.2, №1. – Sophia-Antipolis, 2019. – P. 132 – 150.
5. Cheng W. The complexity of Channel Scheduling in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Networks/W.Cheng, X. Znati, X. Lu // Proc. Of Infocom – 2019. – P. 1 – 9.
6. Laufer R. Multirate Anypath Routing in Wireless Mesh Networks/R. Laufer, H. Dubois-Ferriere, L. Kleinrock // IEEE In INFOCOM 2009. The 28th Conference on Computer Communications. – 2009. – P. 37 – 45.
7. Ватаманюк А. И. Беспроводная сеть своими руками/А. И. Ватаманюк. – СПб.: Питер, 2006. – 192 с.
8. Вишневский В.М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G/В.М. Вишневский, Л.С. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфер, а 2009. – 472 с.
9. Гургенидзе А.Т. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа/А.Т. Гургенидзе, В.И. Кореш. – СПб.: Наука и техник, а 2003. – 400 с.
10. Миночкин А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях: проблема и пути ее решения/А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Журнал «Зв'язок». – 2006. –

№6. – С. 15 – 21.

11. Шиллер Й.А. Мобильные коммуникации: Пер. с англ./Й.А. Шиллер. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2002. – 384 с.

12. Миночкин А.И. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях/А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Журнал «Зв'язок». – 2004. – №2. – С. 46 – 50.

13. Вишневский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации/В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М: Техносфер, а 2005. – 592 с.

14. Осипов И.Е. Mesh-сети: технологии, приложения, оборудование/И.Е. Осипов // Технологии и средства связи. – № 4. – 2006. – С. 38 – 45.

15. Ekram Hossain Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols/Ekram Hossain, Kin Leung // Springer – London, 2008. – 351 p.

16. Akyildiz I. A survey on wireless mesh networks/I. Akyildiz, W.Wang // IEEE Communications Magazine – 2005. – Vol. 43, no. 9. – P. 523 – 530.

17. Merlin S. Resource allocation in multi-radio multi-channel multi-hop wireless networks/S. Merlin, N. Vaidya, M. Zorzi // In Proc. INFOCOM – 2008. – P. 610 – 618.

18. Faccin S.M. Mesh WLAN networks: concept and system design/S.M. Faccin, C. Wijting, J. Kenckt, A. Damle // IEEE Wireless Communication – 2006. – Vol 13, No. 2. – P. 168 – 179.

19. Aggielou G. Forecasting Network Disconnections in Mobile Wireless Mesh Networks/Aggielou G. // Submitted for publication, IEEE Journal on Selected Areas in Communications – 2008. – P. 62 – 70.

20. Akyildiz I. F. Wireless mesh networks: a survey/I. F. Akyildiz, X. Wang, W. Wang, // Computer Networks – Vol. 47. – 2005. – P. 445 – 487.

21. Duffy K. Modeling 802.11 mesh networks/K. Duffy, D.J. Leith, T. Li, D. Malone // IEEE Comm. Magazine. – New York: 2007. – Vol. 10, no 6. – P. 635 – 637.

22. Yan Zhang Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and

Standards/Yan Zhang, Jijun Luo, Honglin Hu // AuerbachPublications – 2007. – 212 p.

23. Raniwala A. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks/A. Raniwala, K. Gopalan, T. Chiueh // ACM Mobile Computing and Communications Review – 2004. – Vol. 8. – P. 50 – 65.

24. Lyakhov A. IEEE 802.11 Direct Links: Interference Classification and Modeling./A. Lyakhov, I. Pustogarov, A. Gudilov // Revised Selected Papers From Int. Workshop of Multiple Access Communications – MACOM 2008 – P. 15 – 24.

25. Гольдштейн Б.С. Проблемы перехода к мультисервисным сетям/Б.С. Гольдштейн. – Вестник связи. – 2002. – № 12. – С. 26 – 31.

26. Харитонов В.В. Качество обслуживания и эффективное использование ресурсов в мультисервисных сетях/В.В. Харитонов, В.Х. Харитонов // Вестник связи. – 2004. – №12. – С. 48 – 55.

27. Шварцман В.О. Качество услуг сетей следующего поколения/В.О. Шварцман // Электросвязь. – 2006. – №3. – С. 26 – 31.

28. Григорьев В. А. Сети и системы радиодоступа/В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. – М.:Эко-Трендз, 2005. – 384 с.

29. Бертсекас Д. Сети передачи данных/Д. Бертсекас, Р. Галлагер. – М.: Мир, 1989. – 544 с.

30. Chiang M. Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks: Joint Optimal Congestion and Power Control/M. Chiang // IEEE Journal on Selected Areas in Commun – Vol. 23, no. 1. – 2005. – P. 104 – 116.

31. Skalli H. Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions/H. Skalli, S. Ghosh, S.K. Das, L. Lenzini, M. Conti // IEEE Comm. Magazine – 2007. – Vol. 45, no. 11 – P. 86 – 95.

32. Lee G. M. A survey of multipath routing for traffic engineering/G. M. Lee // Proc. of LNCS 3391. – Springer-Verlag, 2005. – Vol. 4. – P. 635 – 661.

33. DeBeasi R. Military ResearchAimsto Develop Self-Configuring, SecureWireless Nets/R. DeBeasi // Network World – Vol. 16 – 2006. – P. 88 – 99.

34. H.-J. Ju Efficient Backbone Synthesis Algorithm for Multi- Radio

Wireless Mesh Networks/H.-J. Ju, Rubin // Proc. IEEE Wireless Communication and Network Conference (WCNC) – Las Vegas, Nevada, 2006. – P. 258 – 263.

35. Raniwala A. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network/A. Raniwala, Tzicker Chiueh // Proc. of INFOCOM '05 – Vol. 3. – 2005. – P. 2223 – 2234.

36. Ляхов А.И. Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности/А.И. Ляхов, И.А. Пустогаров, С.А. Шпилев // Информационные процессы. – 2008. – Том 8, № 3. – С. 173 – 192.

37. Kyasanur P. Capacity of multi-channel wireless networks: Impact of number of channels and interfaces/P. Kyasanur, N. Vaidya // In ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM) – 2005. – Vol. 31 – P. 3995 – 4004.

38. Ishmael J. S. Race Deploying Rural Community Wireless Mesh Networks/J. S. Ishmael, D. Pezaros, N. Race // IEEE Internet Computing – 2008. – P. 22 – 29.

39. Naveed A. Topology Control and Channel Assignment in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks/Naveed A., Salil S. Kanhere, Sanjay K. Jha // Proc. of MASS '07 – 2007. – P. 1 – 9.

40. Tawarmalani M. Global optimization of mixed-integer nonlinear programs: A theoretical and computational study/M. Tawarmalani, N.V. Sahinidis // Mathematical Programming. – 2004. – Vol. 99(3). – P. 563 – 591.