

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА
ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-63
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Ленков І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Горбенко В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

телекомунікаційних систем та мереж

В.Ф. Заїка

“ ”

_____ 2019 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ленкову Івану Вадимовичу

1. Тема роботи: “Методи організації телекомунікаційних мереж на основі безпілотних літальних апаратів”,

керівник роботи Горбенко Володимир Михайлович, к.в.н., доцент,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.11.2019 №518.

2. Строк подання студентом роботи 20.12.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Безпроводові мережі.
2. Середовище Smart City.
3. Сучасні технології у контексті розумного міста
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Дослідження стану питання розгортання телекомунікаційної інфраструктури розумного міста
2. Дослідження сучасного стану у галузі Smart Lighting та середовища Smart City
3. Огляд сучасних технологій у контексті розумного міста
4. Концептуальна архітектура розумного міста

5. Перелік графічного матеріалу (назва слайдів презентації):

1. Мета роботи;
2. Цільові області для забезпечення сталого цифрового розвитку «Розумного міста» у Києві.
3. Частка ринку за технологією на світовому ринку освітлення
4. Порівняння між найбільш релевантними характеристиками протоколів.
5. Вимоги на архітектурному рівні Smart City
6. Технологія IEEE 802.15.4
7. Розподіл світильників у центральній частині Києва
8. Технологія LoRaWAN
9. Технологія NB –IoT. Технологічне порівняння між LTE-M та NB-IoT
10. Концептуальна архітектура розумного міста
11. Висновки
12. Апробація результатів магістерської роботи

6. Дата видачі завдання 05.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	27.09.19	Викон.
2.	Дослідження стану питання розгортання телекомунікаційної інфраструктури розумного міста	15.10.19	Викон.
3.	Дослідження сучасного стану у галузі Smart Lighting та середовища Smart City	31.10.19	Викон.
4.	Огляд сучасних технологій у контексті розумного міста	15.11.19	Викон.
5.	Концептуальна архітектура розумного міста	29.11.19	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	10.12.19	Викон.
7.	Розробка презентації	18.12.19	Викон.

Студент

Ленков І.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Горбенко В.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 75 сторінок; 30 рисунків, 4 таблиць, 27 джерел.

Об'єкт дослідження – літаючі сенсорні мережі.

Предмет дослідження – комплекс моделей і методів для літаючих сенсорних мереж.

Мета роботи – дослідження методів організації телекомунікаційних мереж на основі безпілотних літальних апаратів

Методи дослідження – методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування і теорії телетрафіка, імітаційного моделювання. Також використовувалися кількісний та якісний аналіз та метод системного аналізу.

У магістерській роботі було проведено широке дослідження майбутньої парадигми Інтернету, екосистеми Smart City та освітлювальної індустрії, щоб вирішити масштаби роботи. Основні цілі були поставлені для дослідження поточного стану ситуації, висвітлення неоднорідності рішень, наявних на ринку, та надання практичних рекомендацій для успішного здійснення такого типу перетворення міської дійсності.

БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, SMART CITY, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА ІНФРАСТРУКТУРА, ІНФРАСТРУКТУРА РОЗУМНОГО МІСТА, ІОТ, LORA I IEEE 802.15.4, ТЕХНОЛОГІЯ LORAWAN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ХХІ СТОЛІТТЯ.....	13
1.1. Бездротові сенсорні мережі	13
1.2. Концепція телекомунікаційних мереж і систем Інтернету речей.....	17
1.3. Концепція телекомунікаційних мереж і систем тактильного Інтернету..	20
1.4. Розвиток концепції Інтернету речей - доповнена реальність	25
1.5. Мережі зв'язку п'ятого покоління.....	27
1.6. Радіокеровані літаючі мережі	30
2. НОВИЙ ВИД МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ - ЛІТАЮЧІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ	32
2.1. Причини виникнення літаючих сенсорних мереж	32
2.2. Типова структура літаючої сенсорної мережі.....	37
2.3. Архітектура літаючих сенсорних мереж.....	39
2.4. Напрямки досліджень в області літаючих сенсорних мереж.....	41
3. ЛІТАЮЧА СЕНСОРНА МЕРЕЖА ЯК СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	45
3.1. Безпілотний літальний апарат як система масового обслуговування	45
3.2. Модель фрагмента літаючої сенсорної мережі для передачі даних на великі відстані	56
ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BTM	бездротова телекомунікаційна мережа
BSM	безпроводна сенсорна мережа, що складається з великої кількості мініатюрних вузлів, кожен з яких містить мікроконтролер, прийомопередавач й автономне джерело
MCO	самоорганізуючі мережі
РЛА	радіокерованих літаючих апаратів
LEACH	базовий алгоритм
M2M	англ. Machine-to-Machine, M2M – взаємодія машина – машина, загальна назва технології
LTE	англ. Long Term Evolution – розглядається як еволюція технології UMTS, є стандартом високошвидкісного бездротового зв'язку передачі даних
MSE-T	(ITU-T) - сектор стандартизації електрозв'язку
MSE	англ. International Telecommunication Union, ITU - міжнародний союз електрозв'язку
3GPP	3GPP англ. 3rd Generation Partnership Project — партнерська асоціація груп телекомунікаційних компаній, головною метою створення якої є розробка і затвердження стандартів для мережевих технологій третього покоління (3G)
ІМТ	англ. International Mobile Telecommunications – міжнародний мобільний зв'язок
FANET	англ. Flying Ad Hoc Network – безпроводні мережі, що самоорганізуються на базі безпілотних летаючих апаратів
NGN	англ. Next Generation Networks, New Generation Networks — мережі наступного/нового покоління
VoIP	англ. Voice over IP – голос через IP – технологія передачі медіа-даних у реальному часі за допомогою сімейства протоколів TCP/IP, IP-

	телефонія
IMS	англ. IP Multimedia Subsystem — специфікація передачі мультимедійного контенту в електросвіязі на основі протокола IP.
IoT	англ. Internet of Things – інтернет речей
GUI	англ. Graphical user interface – графічний інтерфейс користувача
IETF	Internet Engineering Task Force — відкрите міжнародне співтовариство проєктувальників, вчених, сітьових операторів та провайдерів
IEEE	англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers — інститут інженерів електротехніки та електроніки
HSPA	англ. High Speed Packet Access — високоскоростна пакетна передача даних

ВСТУП

Початок ХХІ століття ознаменувався досить широким впровадженням БТМ і БСМ, що представляють собою перші самоорганізуючі мережі, які почали використовуватися на мережах зв'язку загального користування - самоорганізуючі мережі вже діють у багатьох країнах світу і в Україні. Безліч науково-дослідних робіт в цій галузі, поява стандартів Міжнародного союзу електрозв'язку, успішне впровадження багатьох пілотних проектів сприяли тому, що на початку другого десятиліття ХХІ століття ці роботи були продовжені вже в напрямку створення і впровадження концепції Інтернету речей.

Концепція Інтернету речей, технологічною основою якої в багатьох її додатках стали БТМ і БСМ, має на увазі перш за все принципову зміну кількісних характеристик мережі. Включення речей, і фізичних, і віртуальних, в клієнтську базу мереж зв'язку призводить до необхідності вирішення проблем побудови таких мереж, в яких число терміналів буде обчислюватися вже трильйонами, на відміну від мільярдів в традиційних. Така кількісна зміна в області мереж зв'язку підштовхнула світове наукове співтовариство до усвідомлення того факту, що мережі при реалізації концепції Інтернету речей повинні бути здатними до самоорганізації. Останнє вимагає перегляду ряду основних підходів до розробки і дослідження моделей і методів побудови мереж, багато з яких були випробувані на етапі впровадження БТМ і БСМ [1].

Однак не тільки кількісні зміни вплинули на формування сучасних мереж зв'язку у плинному десятилітті ХХІ століття. Технологічний прогрес дав можливість приступити до створення літаючих мереж, тактильного Інтернету, використання доповненої реальності для надання нових телекомунікаційних послуг, а також до створення надшідьних мереж з надмалими затримками, так званих мереж зв'язку п'ятого покоління.

У даній магістерській атестаційній роботі дослідження сконцентровані на

питаннях забезпечення ефективності, надійності і продуктивності літаючих мереж. Поява безпілотних літальних апаратів (спочатку досить великих) для вирішення завдань військового характеру, а потім і значно менших і зовсім малих та, навіть й мікро-РЛА – значно розширило область їх застосування, в тому разі і сфері вирішення багатьох цивільних завдань. При цьому спочатку використання цих апаратів з точки зору збору інформації для цивільних цілей в основному базувалося на використанні результатів відеозйомки і здійснювалося, як правило, РЛА не об'єднаними в мережу.

Досить широке поширення РЛА, можливість (за певних регуляторних умовах) їх використання навіть фізичними особами привели до появи цілого ряду нових науково-дослідних завдань. В першу чергу виникла необхідність постановки та розв'язання комплексу науково-дослідних завдань в області мереж безпілотних радіокерованих літаючих апаратів (РЛА). Масштабне впровадження до теперішнього часу БТМ і БСМ мереж, а також необхідність збору інформації з них (навіть в умовах знаходження цих мереж в важкодоступних місцевостей) привели до необхідності розглядати РЛА або мережу РЛА як елементи великих мереж з можливостями виконання ряду особливих функцій, наприклад, головних вузлів сенсорної мережі [2].

При цьому для збору інформації з сенсорних полів з використанням РЛА повинні використовуватися протоколи БТМ сенсорних мереж, а для передачі інформації в МСО-протоколи мереж зв'язку загального користування.

Використання РЛА фізичними особами вимагає, природно, розробки сучасних моделей і методів для їх ідентифікації.

Саме виконання цих взаємопов'язаних нових науково-дослідних завдань і були покладені в основу магістерської атестаційної роботи, в якій визначено, оглянуто і досліджено новий вид мереж зв'язку - літаючі сенсорні мережі, які внаслідок широкого поширення БТМ, БСМ і РЛА загального користування органічно входять в комплекс взаємодіючих мереж електровз'язку МСО.

Метою магістерської роботи є дослідження методів організації телекомунікаційних мереж на основі безпілотних літальних апаратів

Об'єктом дослідження є літаючі сенсорні мережі.

Предметом дослідження є комплекс моделей і методів для літаючих сенсорних мереж.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування і теорії телетрафіка, імітаційного моделювання. Також використовувалися кількісний та якісний аналіз та метод системного аналізу.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на конференціях Державного університету телекомунікацій та опубліковано в науковому журналі «Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку».

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ХХІ СТОЛІТТЯ

1.1. Бездротові сенсорні мережі

Алгоритми вибору головного вузла у бездротових сенсорних мережах.

БТМ і БСМ, як вже зазначалося у вступі, з'явилися технологічною основою для появи концепції Інтернету речей. Крім того, моделі і методи побудови БТМ і БСМ, і це природно, широко використовуються при побудові наземного сегмента літаючих сенсорних мереж.

БТМ і БСМ = самоорганізуючі, що складаються з безлічі мініатюрних сенсорних вузлів, які забезпечують моніторинг явищ, процесів, характеристик навколишнього середовища і т. п. Площина, на якій розташовується БТМ і БСМ, досить часто називають сенсорним полем. Число сенсорних вузлів тільки на одному такому полі може бути настільки велика (у відповідності зі специфікаціями протоколу ZigBee, більш 64 тисяч), що існуючі методи організації інфраструктурних мереж не підходять для реалізації БТМ і БСМ. Самоорганізація дозволяє використовувати сенсорні вузли саме тоді, коли це необхідно, у тому разі при виявленні цими вузлами якої-небудь незвичайної події, або при реконфігурації мережі [2].

Решту часу сенсорні вузли знаходяться в сплячому стані, що дає можливість зберігати їх енергетичні можливості, які як добре відомо є обмеженими. Завдання економії енергії в БТМ і БСМ мережах є однією з найважливіших, оскільки менша витрата енергії на передачу і прийом інформації дозволяє продовжити функціонування сенсорної мережі, або, як прийнято в дослідженнях по сенсорним мережам, збільшити тривалість життєвого циклу БТМ і БСМ сенсорної мережі.

Дуже велике число сенсорних вузлів на одному сенсорному полі підказує дослідникам, що для збільшення життєвого циклу сенсорної мережі доцільно використовувати її кластерну організацію. Кластеризація БТМ і БСМ мережі на

основі базового алгоритму LEACH дозволила збільшити тривалість життєвого циклу такої мережі в 7 разів порівняно з не кластерним сенсорним полем.

Як вже зазначалося вище, БТМ і БСМ мережі називають ще й все проникливими, саме тому, що число їх додатків реально дуже велике і до сих пір не знайдено оптимального алгоритму кластеризації для всіх можливих додатків і, відповідно, всіх моделей сенсорних мереж. Розробка нових алгоритмів кластеризації сьогодні проводиться в багатьох наукових центрах світу.

Для БТМ і БСМ мереж з централізованим управлінням було запропоновано використовувати діаграми Вороного для створення кластера, що дозволило добитися більшої тривалості життєвого циклу мережі в порівнянні з базовим алгоритмом LEACH. Однак централізований вибір головного вузла не завжди можливий, а використовувати для визначення кластера діаграми Вороного в децентралізованій схемі не представляється можливим внаслідок необхідності проведення чималих обчислень для обмежених можливостей сенсорних вузлів. Як зараз відомо діаграми Вороного були ефективно використані в ряді робіт зі створення алгоритмів вибору головного вузла, коли при застосуванні методів нечіткої логіки за допомогою діаграм Вороного визначалося оптимальне значення параметра центральності розташування сенсорного вузла по відношенню до інших сенсорних вузлів передбачуваного кластера, що дозволило досягти кращих (на сьогодні) показників по тривалості життєвого циклу системи.

В [3] запропонований алгоритм, що забезпечує найкраще покриття на протязі тривалого періоду часу для гетерогенних сенсорних мереж. Гетерогенність сенсорної мережі передбачає, що не всі сенсорні вузли мають однакову початкову енергією, охоплюють простір однаковою радіусом дії і т.п.

Як показано метрика найкращого покриття безпосередньо пов'язана з визначенням життєвого циклу БТМ і БСМ мережі. Дійсно, сенсорні мережі використовуються, як правило, для моніторингу на цілком певному просторі. І якщо в початковий період досліджень в області сенсорних мереж вважалося, що

життєвий цикл БТМ і БСМ мережі триває до загибелі останнього сенсорного вузла при вичерпанні їм енергетичного ресурсу, то принципово правильним є і інший підхід, а саме: життєвий цикл сенсорної мережі закінчується при неможливості подальшого виконання цією мережею своїх функцій, наприклад при зменшенні частки покриття контрольованого простору до k %.

БТМ і БСМ мережі можуть складатися і з мобільних сенсорних вузлів, що істотно ускладнює проблему вибору головного вузла і забезпечення стабільності кластера в процесі функціонування мережі. Відповідно до типових моделей швидкість переміщення сенсорного вузла не перевищує 2 м / с , а й при такій швидкості можливо вибуття сенсорного вузла із зони дії головного вузла кластера до закінчення збору і передачі даних цього головного вузла [1].

Все більш широке застосування БТМ і БСМ мереж в різних областях господарської діяльності людини у другому десятилітті ХХІ століття зробило актуальною задачу по створенню алгоритмів вибору головного вузла для тривимірного простору. Можливе використання в тривимірному просторі алгоритму LEACH та інших алгоритмів, розроблених для сенсорних полів на площині, не враховувало висоти об'єкта, в якому розташовується БТМ і БСМ мережа, наприклад в разі моніторингу складських приміщень.

Моделі трафіку для БТМ і БСМ мереж

Хороший огляд робіт з дослідження трафіку в БТМ і БСМ мережах наведено в [4]. Масштабні роботи з вивчення характеристик потоків трафіку в БТМ сенсорних мережах дозволили не тільки встановити їх самоподібний характер для багатьох додатків, таких як телеметрія, медичні мережі, мережі спостереження за ціллю, передача зображень по сенсорним мережам, але і визначити ступінь самоподібності (значення параметра Херста) для кожного з них.

Крім того, було знайдено таке чудове властивість потоків трафіку в БТМ і БСМ мережах, як зміна значення параметра Херста при перевантаженні [5].

Останнє корелюється з іншими роботами по трафіку, в ході яких було встановлено взаємозв'язок значення параметра Херста і суб'єктивних оцінок якості сприйняття відео. Крім того, в процесі вивчення трафіку в сенсорних мережах стеження за ціллю була встановлена залежність між параметром Херста і швидкістю передачі даних в інтервалі ON при використанні для генерації трафіку методу ON / OFF. Це дає можливість істотно спростити процес генерації трафіку з заданим параметром Херста і довготривалої залежністю.

Виявленні у мережах M2M в умовах генерації потоків трафіку взаємозалежності пристроїв не тільки стало важливим науковим результатом саме по собі, але і вимагає, по суті справи, створення нової теорії для роботи з мережами, в яких такі потоки створюються.

Широке впровадження БТМ і БСМ мереж, мереж M2M призводить в умовах появи гетерогенних зон обслуговування до можливого впливу генеруємого цими мережами трафіку на якість обслуговування і якість сприйняття традиційних телекомунікаційних послуг (мова, відео, дані). Тільки службовий трафік, створюваний між смартфоном і базовою станцією LTE, в кілька разів перевищує мовної трафік абонента за добу. Тому одним з основних завдань в найближчій і середньостроковій перспективі стає розробка методів зменшення та згладжування такого трафіку.

Природно, що, як уже зазначалося вище, найважливішим завданням в цьому напрямку досліджень є створення теорії і практичних рекомендацій щодо обслуговування трафіку в мережах з взаємозалежними потоками.

Крім того, з огляду на широке поширення сенсорних мереж, в тому числі і літаючих сенсорних мереж, в найближчій і середньостроковій перспективі розгорнуті роботи по передачі мови і відео поверх протоколів, використовуваних в мережах зв'язку з низьким енергоспоживанням.

Моделі і методи захисту БТМ і БСМ сенсорних мереж від потоків помилкових подій, клонування і навмисних електромагнітних впливів

Особливості БТМ і БСМ сенсорних мереж призводять і до особливостей вторгнень в ці мережі. Дійсно, слабкість енергетичної системи і пряма залежність від її характеристик тривалості життєвого циклу сенсорної мережі роблять привабливими вторгнення в сенсорні мережі, які можуть зменшити життєвий цикл мережі за рахунок відбирання енергії подіями, які сенсорна мережа не повинна піддавати моніторингу, але на які не може не реагувати. Ще одним методом захисту БТМ і БСМ мереж від потоків помилкових подій, крім додання вузлів мобільності, є перерозподіл щільності сенсорних вузлів на сенсорному полі [6].

Внаслідок мініатюризації сенсорних вузлів і їх гранично низькій вартості ще одним видом вторгнень в сенсорні мережі є клонування мережі і її елементів, коли в силу самоорганізації легальний сенсорний вузол взаємодіє з клоноваим сенсорним вузлом точно так же, як і з іншим легальним [7].

Це саме можна сказати і до робіт в області дослідження навмисних електромагнітних впливів, створюваних генераторами надкоротких електромагнітних імпульсів на БТМ і БСМ сенсорні мережі і літаючі сенсорні мережі, де дослідження будуть проводитися на основі наявного істотного наукового доробку.

1.2. Концепція телекомунікаційних мереж і систем Інтернету речей

Концепція Інтернету речей, сформована як новий напрямок розвитку мереж, систем і пристроїв телекомунікацій, була розроблена в серії рекомендацій Y.40 xx / Y.206 x Сектора стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т) на початку другого десятиліття ХХІ століття. До цього часу позначення «Інтернет речей» періодично використовувалося як термін, що означає підключення кавоварки, холодильника і т.п. до Інтернету, починаючи з 1999 року [3].

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) - глобальна інфраструктура для інформаційного суспільства, яка забезпечує можливість надання більш складних послуг шляхом з'єднання один з одним (фізичних і віртуальних) речей на основі існуючих і таких, що розвиваються функціонально сумісних інформаційно-комунікаційних технологій.

Концепція Інтернету речей, розроблена МСЕ-Т, представила широкий погляд на використання речей як рівноправних терміналів мереж зв'язку. При цьому були визначені фізичні речі і віртуальні речі, під останніми малися на увазі речі інформаційного світу, такі як контент. Принципове визначення інтернет речі як речі, що має адресу в мережі і інтерфейс з мережею, дозволило досить точно визначити, які ж з них включаються в концепцію Інтернету речей. Зауважимо, що у визначенні немає жорсткого вказівки на те, що адреса повинна бути в мережі Інтернет, що дає можливість включити до складу речей і безліч сенсорних вузлів, що функціонують на основі протоколу ZigBee і деяких інших.

Реалізація концепції Інтернету речей призводить до принципових змін в клієнтській базі операторів мереж зв'язку. Якщо раніше при побудові мереж зв'язку орієнтувалися на клієнтську базу в мільярди користувачів, то при реалізації концепції Інтернету речей число терміналів мережі зростає на порядки і, за оцінкою відомих фахівців, граничне значення речей, підключених до мережі, може скласти 50 трильйонів. При цьому істотно змінюється територіальна щільність пристроїв і з'являються спочатку щільні, а потім і надщільні мережі. Останнє якраз і є одна з причин, по якій потрібно створення мереж зв'язку нового, п'ятого покоління, що мають абревіатуру 5G (в роботах 3 GPP і IMT -2020 в роботах МСЕ-Т) [8, 26].

Однак не тільки поява надщільних мереж через впровадження концепції Інтернету речей вимагає створення мереж зв'язку п'ятого покоління. Додатки концепції Інтернету речей в медицині і для роботизованих систем зажадали принципово інших затримок для надання послуг, а саме - 1 мс замість існуючих

100 мс. До того ж послуги, засновані на передачі тактильних відчуттів, сформували ще один новий додаток до концепції Інтернету речей - Тактильний Інтернет. Останнє призводить до створення мереж з ультрамалими затримками, що у купі з вимогами по надвисокої щільності ще більш жорстко ставить питання про необхідність переходу до мереж нового покоління.

Ще один новий додаток концепції Інтернету речей - доповнена реальність: його реалізація стає можливою лише за рахунок використання нових можливостей мереж зв'язку для користувача при взаємодії «користувач - річ». Недоступні раніше послуги типу передачі інформації про структуру механізму при необхідності проведення фахівцем або неспеціалістом будь-яких робіт з відновлення або заміни речі, орієнтація користувача в просторі речей при його переміщенні по місту чи іншій території стають можливими при використанні технологій доповненої реальності.

Концепція Інтернету речей носить міжгалузевий характер, що, природно, пояснюється використанням фізичних і віртуальних речей практично в будь-якій сфері життєдіяльності людини і суспільства. При цьому виникає ще одна найважливіша міжгалужева проблема, а саме - ідентифікації продукції на основі впровадження концепції Інтернету речей, що істотно розширює можливості по боротьбі з контрафактною продукцією.

Концепція Інтернету речей породила і ще один додаток - літаючі сенсорні мережі. Літаючі мережі, відомі як FANET і що використовувалися для відеоспостереження і пошуку цілей, з'явилися теж порівняно недавно, в середині першого десятиліття XXI століття. Формування ж концепції Інтернету речей з урахуванням технологічних особливостей безпілотних літальних апаратів дало можливість створити новий додаток цієї концепції - літаючі сенсорні мережі, тісно зв'язані і органічно входять в комплекс нових додатків Інтернету речей, зазначених вище [6, 10].

1.3. Концепція телекомунікаційних мереж і систем тактильного Інтернету

Концепція тактильний Інтернет

Тактильний Інтернет призначений для забезпечення користувачів послугами з передачі тактильних відчуттів. Це пред'являє нові вимоги до мереж зв'язку по тривалості затримок передачі даних, що призводить до появи нового класу мереж - мереж зв'язку з ультрамалими затримками. Далі розглянемо питання еволюції затримок швидкості передачі даних в мережах зв'язку, оцінимо вплив на цей процес концепції тактильні Інтернету і визначимо можливі додатки цієї нової концепції [4].

Друге десятиліття XXI століття в області мереж і систем зв'язку відзначилося формуванням концепції Інтернету речей і початком масштабного впровадження її додатків. Разом з тим п'ять років - цілком достатній термін для того, щоб виникло і новий концептуальний напрямок розвитку мереж і систем зв'язку. Цей напрямок, природно, знову пов'язано з Інтернетом, але тепер має назву «Тактильний Інтернет». Основою для появи концепції тактильні Інтернету стало технологічне розвинення мереж зв'язку в напрямку можливості створення спочатку мереж зв'язку з малими затримками, а потім і мереж зв'язку з ультрамалими затримками. Еволюція мереж зв'язку в напрямку зміни вимог до затримок дозволяє задіяти в наданні послуг користувачеві недоступні раніше для мереж зв'язку тактильні відчуття людини.

Еволюція затримок в мережах і системах зв'язку

Пильна увага до затримок в мережах зв'язку з'явилася на етапі створення мереж загального користування з пакетною комутацією, так званих мереж зв'язку наступного покоління NGN (Next Generation Networks). Передача мови і відео зажадала інтерактивного режиму взаємодії мережі і користувача і визначила вимоги до затримок і їх варіацій. Конкретна варіація затримки отримала назву

джиттера і впливала на якість передачі мови і відео.

Для забезпечення користувача потрібним рівнем якості передачі, яке можна б було порівняти з рівнем якості в телефонних мережах зв'язку загального користування (ТМЗК) - тобто затримка не повинна була перевищувати 100 мс. Ця досить складна задача була вирішена, і на сьогоднішній день частка трафіку пакетної мови VoIP (Voice over IP) перевищила 50% від загального трафіку передачі мови.

Разом з тим при визначенні параметрів затримки вперше в практиці створення мереж і систем зв'язку постала необхідність обліку фізичних обмежень по швидкості передачі інформації. Сектор стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку рекомендує враховувати ці обмеження як 5 мкс на кілометр. Тому формула для обчислення затримки в мережах зв'язку виглядає наступним чином:

$$T = R \times t + \theta, \quad (1.1)$$

де R - відстань,

t - затримка, пов'язана з фізичними обмеженнями по передачі інформації (5 мкс на кілометр),

θ - затримка, яка вноситься технічними засобами мережі.

Уже на етапі впровадження мереж NGN стало зрозуміло, що внаслідок фізичних обмежень щодо передачі інформації не завжди вдається виконати вимоги по затримці в 100 мс. Тому в рекомендаціях МСЕ-Т визначено, що вимога по затримці в 100 мс має виконуватися для найбільших діагоналей в США і Європі. Цими діагоналями для США стала діагональ Дейтона-Біч (Флорида) - Сіетл, а для Європи - діагональ Москва – Лісабон [9, 27].

Для відстаней, що перевищують зазначені вище, прийнятна затримка встановлювалася величиною в 400 мс, що, природно, позначалося і позначається на якості передачі мови і відео. Однак в цілому це не вплинуло на основи

побудови мереж зв'язку загального користування, для яких технологічні досягнення дозволили піти по шляху централізації надання послуг та широкого використання досить потужних централізованих платформ IMS і центрів обробки даних.

Що стосується джиттера, то з появою методу обслуговування потоку пакетів, що отримав назву «Відро жетонів» (Token Bucket), стало можливим використовувати буфери деджиттеризації, і проблема забезпечення необхідного рівня джиттера перестала бути актуальною [4].

В останні роки з'явилися додатки, які зажадали менших затримок, ніж затримки при передачі мови. Йдеться в першу чергу про додатки медичних мереж, де для послуг реального часу вимоги по затримці визначають її величину в 10 мс. Такі мережі були названі мережами з малими затримками, і їх детальне вивчення приведено в роботі. Найважливішим при цьому є навіть не те, що було потрібно істотно великі швидкості на доступі, що буде детально розглянуто нижче, а то, що у формулі (1.1) визначальну роль з точки зору побудови мережі стало грати перший доданок. Це призводить до вимоги децентралізації послуг, які повинні надаватися на мережі зв'язку загального користування, що, в свою чергу, повинно змінити і структуру побудови мережі.

Подальший крок в еволюції затримок в мережі пов'язаний з тактильними Інтернетом. Тактильний Інтернет передбачає можливість передачі тактильних відчуттів людини, що вимагає затримки в передачі інформації по мережі величиною в 1 мс. За аналогією з мережами зв'язку з малими затримками ми назвали ці мережі мережами зі свехмалими затримками. У мережах з свехмалими затримками відбувається подальша децентралізація надання послуг. При цьому можна вважати, що 0 у формулі (1.1) за рахунок вимоги по використанню надшвидкісних систем на доступі буде прагнути до нуля в порівнянні із значенням $R * t$.

Значення затримок для різних мереж наведені в табл. 1.1.

Значення затримок для різних мереж

Найменування мережі	Значення затримки, мс
NGN	100
Медичні мережі	10
тактильний Інтернет	1

Еволюція вимог до швидкості передачі

У мережах NGN одним з найбільш прогресивних рішень з'явився широкосмуговий доступ. Залежно від конкретних умов широкосмуговий доступ може бути як провідним, так і БТМ. При цьому в якості цільових значень швидкості доступу розглядалися, наприклад, 127 Мбіт / с для великих міст і 70 Мб / с для міст з населенням більше 100 тисяч чоловік. Таким чином, в рамках впровадження концепції NGN швидкість доступу в десятки і сотні Мб / с вважається цілком задовільною. При цьому для магістрального рівня мереж зв'язку загального користування переважно використовуються системи передачі зі швидкостями в десятки і сотні Гб / с.

Поява мереж з малими затримками призвело до того, що швидкості передачі при швидкості доступу на рівні Мб / с виявилися недостатніми для надання нових послуг. Мережі доступу в таких мережах доцільно будувати на основі гігабітних мереж, що при агрегації потоків трафіку призводить до необхідності використання терабітних систем передачі на магістральних ділянках мережі.

З іншого боку, багато додатків концепції Інтернету речей вимагають для передачі інформації низькошвидкісні мережі зі швидкостями 100-200 кбіт / с.

Все це знайшло відображення і в нових стандартах в області мереж і систем зв'язку. Дійсно, стандарти IEEE 802.11 ac, IEEE 802.11 ad і IEEE 802.11 ah можуть надавати послуги користувачам на швидкостях 3,2 і 7,0 Гбіт / с відповідно. У той же час новий стандарт IEEE 802.11 ah при досить великому радіусі покриття в 1

км розрахований на передачу інформації зі швидкостями в декілька сотень Гбіт / с, що цілком достатньо для більшості додатків Інтернету речей. Відбувається поділ мереж на гігабітні і низькошвидкісні. Останнє підтверджується і спробою розробити економічну систему тривалої еволюції LTE (Long Term Evolution).

Поява тактильних Інтернету і мереж зв'язку із надмалими затримками для його реалізації ще в більшій мірі сприяє розглянутому вище процесу диференціації мереж. Дійсно, затримки в 1 мс зажадають використання терабітних систем на рівні доступу, що при агрегації потоків трафіку на магістральних мережах призведе до необхідності використання на цьому рівні мережі вже петабітних систем передачі. Значення швидкостей передачі для різних мереж наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2.

Значення швидкостей передачі для різних мереж

Найменування мережі	Швидкість на доступі	Швидкість на магістральному ділянці
NGN	Мбіт / с	Гбіт / с
Мережі зв'язку з малими затримками	Гбіт / с	Тбіт / с
тактильний Інтернет	Тбіт / с	Пбіт / с

Додатки тактильного Інтернету

Концепція тактильного Інтернету настільки нова, що на сьогоднішній день можна побачити лише одиничні додатки, які, тим не менш, навіть на перший погляд надзвичайно цікаві.

В першу чергу це додатки доповненої реальності, для яких використання мереж з над малими затримками дозволить перетворити світ Інтернету речей в максимально реальний. Природно, передача тактильних відчуттів призведе до появи нових додатків для медичних мереж. Вельми очевидні і додатки для умов

надзвичайних ситуацій. Перерахованих трьох напрямків застосування концепції тактильного Інтернету цілком достатньо для того, щоб поставитися до тактильних Інтернету як до нового напрямку розвитку мереж і систем зв'язку.

1.4. Розвиток концепції Інтернету речей - доповнена реальність

Доповнена реальність (ДР) як додаток Інтернету речей

Доповнена реальність - один з додатків концепції Інтернету речей. Інтернет речей використовується в будинках і на промислових підприємствах, де пристрої підключаються до Інтернету з метою розширити можливості їх використання та підвищити корисність.

Ідея використання доповненої реальності спільно з іншими пристроями і об'єктами Інтернету речей не нова. За допомогою ДР віддалене управління роботом дозволяє проникати в небезпечні місця або виконувати складні завдання, які вимагають зв'язку з мережею, складними пристроями і сенсорами. Доповнена реальність, поєднуючи в собі реальний світ і віртуальність, може бути використана в навчальних та розважальних цілях, а також в експлуатації і обслуговуванні складних систем [5].

Тривимірний віртуальний світ, який є ядром доповненої реальності, повинен бути придуманим, змодельованим і бути обробленим в спеціальній системі, яку називають «движок» (англ. Engine). Такий процес близький до процесу створення відео- і комп'ютерних ігор. Фактично це і є відеогра, в якій головним героєм виступає сам користувач, а не персонаж, яким герой може тільки управляти. Через ці подібності з іграми для створення ДР широко застосовуються 3D-ігрові движки.

Популярність і затребуваність відеоігор пояснює велику різноманітність доступних для розробників ігрових движків, таких як Unity 3 D, Unreal Engine, Unigine.

Основне призначення будь-якого движка - це управління GUI (Graphical User Interface - графічний інтерфейс користувача), сценами віртуального світу і їх візуалізацією, зв'язком між об'єктами в сцені (т. е. користувач може взаємодіяти з об'єктами), подіями (наприклад, зіткненнями), а також стимулювати виконання скриптів. Деякі двигуни допомагають розробникам забезпечити мережеву взаємодію між клієнтської і серверної сторонами.

Застосування технології доповненої реальності як частини Інтернету речей

Поєднання Інтернету речей і доповненої реальності дозволяє виявити новий напрямок - віртуальне середовище речей (англ. Virtual Environment of Things). Джин Вей Ву в своїй статті про віртуальному середовищі речей представила концепцію інтеграції розумних речей реального світу і об'єктів віртуального світу в комп'ютерному віртуальному середовищі, що забезпечує взаємодію сутностей один з одним в обох світах в режимі реального часу. Це дає новий виток у розвитку доповненої реальності: віртуальне середовище, яке може бути змінена зовнішніми об'єктами, і віртуальні дії, які привносять зміни в навколишній нас реальний світ.

Активний розвиток отримала концепція «Розумних міст» з метою підвищити якість управління і продуктивність міських послуг, знизити витрати на споживання ресурсів і більш ефективно взаємодіяти з городянами. Це стало можливим за рахунок збільшення кількості інтернет речей і підвищення їх доступності для людей, що, в свою чергу, дозволяє отримувати все більше даних в містах для аналізу.

Наступним кроком для таких систем має стати їх інтегрування у віртуальне середовище. Така інтеграція не тільки забезпечить реалістичне уявлення про минуле і поточний стан міста, а й дозволить спрогнозувати можливі майбутні сценарії. Приклад такої системи вже розроблено в Китаї для використання даних від датчиків, об'єднаних в мережу, і забезпечуючи зеднання віртуального і реального світів. Ця платформа доповненої реальності зосереджена на

відстеженні пожеж та моделюванні наслідків стихійних лих, для того щоб дати рекомендації щодо поліпшення ефективного реагування на надзвичайні ситуації.

Ще один подібний проект був реалізований в Японії для інтеграції даних про трафік і моделювання руху на дорогах в Токіо, на основі даних від вільного ресурсу OpenStreetMap. Проект використовується для симуляції управління віртуальним автомобілем в 3D [5].

Ці проекти з використанням доповненої реальності відкривають нові можливості для моделювання аварійних ситуацій і природних лих з метою тренування рятувальних служб, а також зменшення наслідків подій та запобігання руйнувань, що дозволяє скоротити людські жертви. Так, наприклад, у роботі [8] наводяться результати дослідження з управління РЛА за допомогою окулярів доповненої реальності і методам оцінки параметрів якості сприйняття відео.

1.5. Мережі зв'язку п'ятого покоління

Поява такого великого числа нових технологій телекомунікацій, не могла не породити принципового впливу на еволюцію мереж зв'язку. До початку другого десятиліття XXI століття значний прогрес був досягнутий в області досліджень, розробки і впровадження пакетних мереж зв'язку загального користування, так званих мереж зв'язку наступного покоління NGN (Next Generation Networks). Реалізація цих мереж на основі комплексу рекомендацій Сектора стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку, протоколів сигналізації, розроблених IETF, широкосмугового БТМ доступу, виконаного на базі стандартів IEEE, дозволила створити нову організацію пакетної мережу зв'язку загального користування. Одночасне розвиток мереж стільникового рухомого зв'язку в напрямку мереж зв'язку четвертого покоління на основі стандартів 3 GPP дало можливість подолати якусь відсталість цих мереж, пов'язану з реалізацією систем третього покоління на базі принципів комутації каналів. Останнє істотно

обмежувало можливості мереж стільникового рухомого зв'язку, незважаючи на спроби впровадження високошвидкісної передачі даних при впровадженні технологій HSPA (High Speed Packet Access) і HSPA +.

Впровадження мереж зв'язку четвертого покоління на базі системи з пакетною комутацією тривалої еволюції LTE (Long Term Evolution) ознаменувало собою значний крок вперед в області еволюції мереж стільникового рухомого зв'язку, дозволивши не тільки істотно збільшити швидкість на доступі, але і зменшити затримки при встановленні з'єднань. Крім того, еволюційний розвиток в сторону LTE вперше надав можливість побудови гетерогенних мереж, коли в зону обслуговування базової станції LTE входили не тільки традиційні термінали стільникових мереж, але і вузли БТМ сенсорних мереж, автомобільних мереж і т. п [3].

На етапі розвитку мереж зв'язку четвертого покоління в науково-дослідних роботах також стався істотний прорив, пов'язаний в першу чергу з появою досліджень в області гетерогенних мереж і кооперативної передачі.

Однак, незважаючи на істотні успіхи в еволюційному розвитку і фіксованих, і мобільних мереж, майбутнє широкомасштабне впровадження концепції Інтернету речей, тактильні Інтернету, доповненої реальності і т.п. призвело науково-дослідні, а потім і дослідно-конструкторські роботи до необхідності створення нової методології побудови мереж зв'язку. Сьогодні методологія ґрунтується на інтеграції всіх можливостей і фіксованих мереж, і мереж стільникового рухомого зв'язку для забезпечення вимог нових технологій по надщільності мережі з надмалими затримками з гарантованим рівнем якості обслуговування і якості сприйняття як для фізичних користувачів, так і для пристроїв.

Саме це і призвело до створення нової концепції побудови мереж зв'язку, що отримала назву мереж зв'язку п'ятого покоління в 3 GPP і IMT 2020 на MCE-T. Ще раз підкреслимо, що 5G - це не мережа радіодоступу, а інтегральна мережа,

яка об'єднує в собі всі можливі ресурси і фіксованих мереж, і мереж стільникового рухомого зв'язку [6, 14].

Для ілюстрації останньої тези на рис. 1.3 приведена структура мереж 5G, що об'єднує в собі можливості названих мереж зв'язку. Структура на рис. 1.4 реалізована на базі однієї з останніх пропозицій щодо побудови мереж зв'язку п'ятого покоління як багаторівневої системи хмар, яка має на увазі розміщення мікрохмар на рівні терміналів, міні-хмар - на рівні базових станцій, а макрохмар - на рівні операторських мереж. Там доведено, що таке рішення може забезпечити прийнятну затримку при реалізації мереж зв'язку п'ятого покоління. Архітектура багаторівневої системи приведена на рис. 1.4 [15].

Занадто щільні властивості мереж зв'язку п'ятого покоління і вимоги щодо ультрамалих затримок призводять до організації в рамках цих мереж нового виду взаємодії «пристрій - пристрій» D2D (Device - to - Device). Реалізація такої взаємодії між двома пристроями, якими можуть бути і термінали користувачів і інтернет речі, можлива без участі базової станції, що, крім усього іншого, істотно економічніше з точки зору витрат мережею електроенергії. Останнє також дуже важливо при реалізації сучасних мереж зв'язку, оскільки вже в даний час існують оцінки щільності пристроїв на 1 кв. км в 1 мільйон одиниць.

Економічні системи з точки зору витрат електроенергії знаходять все більше застосування в сучасних мережах зв'язку. Останнім часом в рамках робіт IEEE розроблено сімейство стандартів LPWAN (Low Power Wide Area Networks) для мереж з низьким енергоспоживанням, що працюють в великомасштабних мережах на великих відстанях. Використання технології LPWAN в мережах п'ятого покоління є надзвичайно важливим як з точки зору включення в ці мережі віддалених груп користувачів (наприклад, сенсорних полів в сільській місцевості), так і для забезпечення необхідного рівня зв'язності, наприклад, для швидко рухомих об'єктів, коли освічені в рамках зони базової станції для таких об'єктів кластери не є стійкими внаслідок їх швидкого переміщення.

1.6. Радіокеровані літаючі мережі

В даний час для реалізації мереж зв'язку п'ятого покоління передбачається використання всіх нових технологічних досягнень з метою створення інтегральної мережі. Одним з найбільш важливих технологічних досягнень XXI століття є створення і широке поширення безпілотних літальних апаратів (РЛА). До теперішнього часу РЛА вже придбали сенс програмно-апаратних засобів загального користування, що вимагає відповідного до них ставлення з боку мереж зв'язку.

Дійсно, сучасний РЛА, доступний і для фізичних осіб, з точки зору мережі може являти собою інтернет річ, яка, крім обов'язкової адреси в мережі і інтерфейсу з нею, має і деяку принципову специфіку, а саме: може літати і утворювати мережі як з іншими інтернет речами на землі, так і з іншими РЛА в повітрі.

Спочатку літаючі мережі сформувалися як літаючі цільові мережі FANET, яким в останнє десятиліття присвячено досить багато робіт вітчизняних і зарубіжних вчених.

Ці роботи присвячені загальним принципам побудови мереж FANET, використання безпілотних літальних апаратів і їх рою для пошуку мети, спеціально обладнаних сенсорними датчиками у військових цілях, або протоколам маршрутизації мереж FANET, поведінки головних вузлів сенсорних мереж в тривимірному просторі та іншим завданням. Найбільш близькою до заявленої тематики є робота, в якій поліпшувалася зв'язність БТМ сенсорних мереж у військових операціях з використанням спеціалізованих РЛА [6, 11, 14].

У магістерській роботі, досліджується комплекс моделей і методів для літаючих сенсорних мереж, побудованих з використанням РЛА загального користування на основі протоколів БТМ сенсорних мереж ZigBee, LoWPAN, Thread, RPL і протоколів мереж сімейства LPWAN. Такий підхід дозволяє

говорити про новий класі мереж - літаючих сенсорних мережах, які є частиною МСО і призначені для надання нових послуг як користувачам МСО, так і пристроям літаючих мереж при міжмашинної взаємодії М2М при реалізації концепції Інтернету речей, а також мереж зв'язку п'ятого покоління.

Літаюча сенсорна мережа включає в себе два сегмента - наземний і літаючий. Дослідженню проблем побудови і функціонування БТМ сенсорних мереж на площині присвячено досить багато робіт вітчизняних і зарубіжних вчених. В умовах же літаючої сенсорної мережі при взаємодії наземного і літаючого сегмента виникає цілий ряд нових завдань, який дозволяє додати в функціонування наземного сегмента ряд нових можливостей, таких як, наприклад, використання РЛА в якості елемента, що поліпшує зв'язність вузлів мережі VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) [17, 20].

2. НОВИЙ ВИД МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ - ЛІТАЮЧІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

2.1. Причини виникнення літаючих сенсорних мереж

За останні два десятиліття в результаті стрімкого технологічного прогресу в комунікаційних і мережних технологіях з'явилася унікальна можливість використання безпілотних літальних апаратів практично у всіх сферах життя суспільства. Спочатку РЛА призначалися для військових цілей, але активно почали впроваджуватися і в громадянську сферу застосування. Ці невеликі пристрої, оснащені різними сенсорами і засобами зв'язку, знаходять активну використання в правоохоронних структурах, дорожньому і сільському господарстві, будівництві, ЗМІ і т.д. На період з 2015 по 2020 рік розподіл попиту на РЛА загального користування, згідно з документами організацій Європейського союзу, виглядає наступним чином (рис. 2.1) [7, 12]:

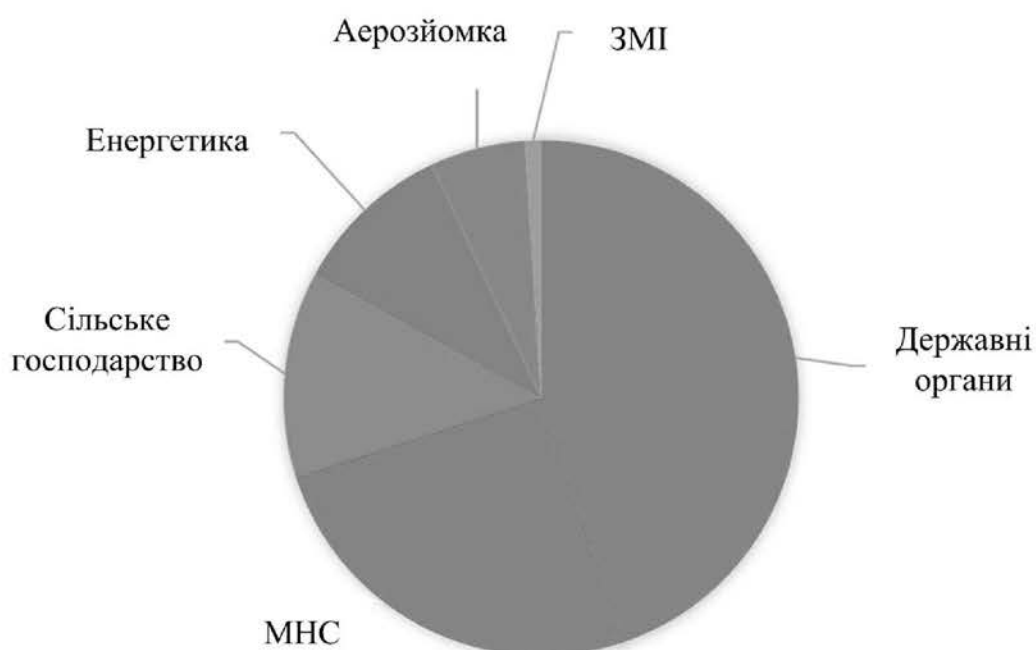


Рисунок 2.1. Діаграма розподілу попиту РЛА загального користування

Одним з напрямків, що активно освоюють літаючі сенсорні мережі, є контроль величезних площ виноградників, зернових культур і багатьох інших посівів. Облітаючи великі території і збираючи дані з сенсорних полів РЛА зможуть отримувати дані про стан ґрунтів для поліпшення землеробства, розпорошувати добрива, застосовувати засоби для захисту рослин від комах і птахів, а також на основі зібраної інформації робити прогнози про врожайність і про необхідність або частоті збору даних. Найбільшим ринком для РЛА стане саме сільське господарство, так як тільки для його обслуговування найближчим часом буде потрібно кілька десятків тисяч безпілотних літальних пристроїв.

Літаючі сенсорні мережі FUSN (Flying Ubiquitous Sensor Network) є одним з класів БТМ або всепроникаючих сенсорних мереж WSN / USN. Технологія даних мереж заснована на самоорганізаційному об'єднанні безлічі різних датчиків з низьким енергоспоживанням в мережу і їх розміщенні в важкодоступних місцях. Передача даних здійснюється за допомогою протоколів ZigBee, Bluetooth, 6 LoWPAN.

Зародження сенсорних мереж почалося в другій половині XX століття, а саме в 1980 році, коли американське оборонне агентство DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) початок дослідження за програмою «Розподілені сенсорні мережі» DSN (Distributed Sensor Networks). Основне завдання даної програми полягало в перевірці застосовності нового підходу для машинної взаємодії, введеного вперше в ARPANET (попередник Інтернету). Дослідникам DARPA було необхідно спроектувати мережу з зонально розподілених датчиків, які повинні були бути недорогими, працювати автономно і обмінюватися даними незалежно один від одного. Такі вимоги до сих пір застосовуються для розробки сучасних сенсорних мереж [6, 10].

У той час апаратна база була слабкою і недосконалою для реалізації сенсорних мереж, тому учасники програми DNS повинні були не тільки визначити концепцію сенсорних мереж і самих сенсорів, а й здійснювати

безпосередньо саму технічну розробку.

Серед найважливіших областей досліджень, на думку розробників DNS, були виявлені обробка сигналів, розподілені обчислення і передача інформації по БТМ каналах зв'язку.

В кінці 1980-х років з'явилося кілька версій сенсорних мереж, такі як:

- тестова сенсорна мережа під керуванням операційної системи Accent, Університет Карнегі - Меллон (США), 1981 р.;
- тестова акустична сенсорна мережа для спостереження за маршрутами вертольотів, Массачусетський технологічний інститут (США), 1984 р.;
- тестова сенсорна мережа, ускладнена алгоритмами розподілених обчислень, Advanced Decision Systems (США), 1986 р.

Поява сенсорних мереж - це одне з технологічних досягнень в комунікаційній сфері. Подальший розвиток і вдосконалення цієї ідеї, яка знайшла широке застосування в системах передачі інформації, призвело до появи нового виду комунікаційних мереж, які отримали назву «Ad-Нос-мережа», або «цільова мережа». Особливість даної мережі полягає в динамічній, що не має постійної структури топології, що складається з автономно працюючих вузлів, які можуть здійснювати зв'язок з сусідніми вузлами і об'єднаних в самоорганізуючі мережи. У разі виходу з ладу одного або декількох вузлів інші вузли зможуть встановити нові маршрути, щоб правильно доставити необхідну інформацію. Ad - Нос - мережі також почали активно впроваджуватися в усі сфери суспільства і розділилися на кілька видів: мобільні цільові мережі MANET (Mobile Ad - Нос Network), автомобільні цільові мережі VANET і літаючі цільові мережі FANET (рис. 2.2) [7, 16].

Мобільні цільові мережі MANET

Одним з видів цільових Ad - Нос -мереж прийнято вважати мобільні цільові мережі MANET (Mobile Ad - Нос Network). Це самоорганізуючі однорангові БТМ мережі з непостійною топологією і відсутністю чітко вираженої інфраструктури,

призначені для взаємозв'язку між рухомими вузлами зв'язку.

У мобільній мережі кожен вузол може переміщатися по будь-якій траєкторії, і всі ці зміни в топології повинні передаватися іншим вузлам для збереження правильної маршрутизації даних між ними. Учасниками мережі MANET можна вважати все різні мобільні пристрої і гаджети, які можуть розташовуватися на землі, повітряному і водному просторі. Така мережа може бути розгорнута в місцях, де створення стаціонарної інфраструктури неефективно або неможливо. Мобільні цільові мережі також незамінні при рятувальних роботах після стихійних лих або катастроф [18].

Автомобільні цільові мережі VANET

Автомобільні цільові мережі VANET є одним з видів БТМ сенсорних мереж і призначені для забезпечення і підтримки безпеки на дорогах, дозволяючи транспортним засобам обмінюватися між собою даними за допомогою V2V-комунікацій (Vehicle - to - Vehicle) або шляхом підключення до прилеглої фіксованою інфраструктурі V 2 I (Vehicle - to - Infrastructure).

Основними цілями використання мереж VANET є:

- 1) допомога водіям (навігація, запобігання аваріям);
- 2) повідомлення (про ремонтні роботи, про пости поліції, про необхідність зниження швидкості);
- 3) застереження (про стан дороги або перешкоди на ній).

Літаючі цільові мережі FANET

В кінці XX століття зародилася ідея створення літаючих цільових мереж FANET, так як почали з'являтися безпілотні літальні апарати (РЛА), які відразу ж стали модними і актуальними в європейських країнах і США. Дані мережі є здатними до самоорганізації і призначені для взаємодії з мережами загального користування, використовуючи для цього невеликі РЛА і / або РЛА спеціального призначення [7, 11].

Цільова мережа FANET має розподілену бездротову структуру, яка

забезпечує зв'язок між вузлами без будь-якої інфраструктури. У такій мережі РЛА не взаємодіють один з одним, а контактують тільки лише з наземною станцією (рис. 2.3 (1)).

У міру збільшення кількості безпілотних пристроїв, що використовуються в одній мережі, проектування ефективної мережевої архітектури стає серйозною проблемою, а також доводиться стикатися з обмеженням діапазону дальності зв'язку між РЛА і наземною станцією. Для того щоб вирішити проблему малого діапазону дії, можна підключати літальний апарат до супутника, але виникає необхідність засобів зв'язку із супутником на кожному РЛА, що сильно впливає на збільшення вартості обслуговування такої мережі, до того ж при поганих погодних умовах мережу такої архітектури не використовуватиметься (рис. 2.3 (2)).

Може застосовуватися архітектура, що складається з декількох РЛА і двох наземних станцій (рис. 2.3 (3)).

Обмеження в дальності зв'язку можна вирішити шляхом організації каналів зв'язку між безпілотними літальними апаратами. У той час як одні РЛА будуть зв'язуватися з наземною станцією або супутником, інші РЛА зможуть отримувати дані без безпосереднього зв'язку з наземною станцією, а через зв'язок з сусідніми пристроями (рис. 2.3 (4)).

Створення різних архітектур взаємодії РЛА з наземними станціями підняло питання про появу нового виду літаючих мереж, в яких би відбувалася взаємодія як між РЛА, так і з наземними вузлами, яких стає все більше і більше. Такі мережі отримали назву «літаючі сенсорні мережі», або FUSN (Flying Ubiquitous Sensor Network) [10].

2.2. Типова структура літаючої сенсорної мережі

Літаюча сенсорна мережа являє собою два взаємодіючих між собою сегменти: літаючий і наземний (рис. 2.4). У якості літаючого сегмента виступає один або кілька РЛА загального користування. Типовий РЛА загального користування може бути реалізований на базі різних літаючих платформ. Безпілотні літальні апарати, як і пілотовані, бувають літакового (літаки, планери, літаючі крила і ін.), а також вертолітного типу (вертольоти і мультикоптери - літальні апарати з чотирма і більше роторами з несучими гвинтами). У ролі наземного сегмента мережі використовуються інстальовані на місцевості сенсорні вузли [8, 12].

Ці вузли здійснюють збір інформації та при необхідності керують віддаленим об'єктом. Працюють в автономному режимі, мають малий розмір і можуть довго перебувати в режимі сну. Вони можуть збирати дані про вологість, температуру, шуми, тиск, освітленість і т.д. Сенсорні вузли утворюють сенсорні поля, які надають можливість відстежувати різні фізичні процеси на базі датчиків.

Всю інформацію підлетів РЛА може передавати як окремий вузол, так і група сенсорів, яка об'єднана в мережу по стандарту IEEE 802.11 s, що входить до складу стандартів IEEE 802.11 і дозволяє організовувати БТМ ієрархічні Ad - Hoc -мережі.

Окремий сенсорний вузол може передати дані РЛА за допомогою RFID - мітки, яка складається з інтегральної схеми, призначеної для обробки і зберігання інформації, і антени для прийому і передачі сигналів. Максимальна відстань для зчитування даних може досягати до 300 м.

Зв'язок між двома названими сегментами підтримується за протоколами ZigBee, 6L0WPAN, Thread, RPL, BLE і ін. Слід врахувати, що літаючі вузли повинні об'єднуватися в групи для розподілу і збору інформації з наземних датчиків, щоб в разі виходу з ладу одного з РЛА цілісність мережі не порушилася

і не були втрачені зібрані дані [8].

Безпілотні літальні апарати повинні літати по маршруту, заздалегідь запрограмованному, та передавати отриману з сенсорів інформацію базової станції або серверу зберігання і обробки даних або у мобільних мережах або при допомозі сучасних протоколів стандарту IEEE 802.15.4: ZigBee 6LOWPAN, Thread, RPL (рис. 2.5) [21].

2.3. Архітектура літаючих сенсорних мереж

Як було зазначено раніше, літаючі сенсорні мережі являють собою один з видів БТМ сенсорних мереж, тому архітектурно їх можна розділити на однорангові і ієрархічні (кластерні) мережі. З огляду на те, що ЛСМ складається з двох сегментів (літаючого і наземного), кожен з них може бути представлений обома архітектурою.

Одноранговими мережами називаються такі мережі, які можуть спонтанно формувати нову структуру мережі за рахунок самоорганізації вузлів, що дозволяє забезпечити цілісність роботи мережі при виході з ладу будь-якого вузла. Тимчасова мережа має пористу структуру. Всі вузли даної мережі ідентичні по своїх функціональних можливостях, але необхідно вибрати один центральний вузол, який буде приймати, обробляти всі дані і передавати на обробку в мережу (рис. 2.6).

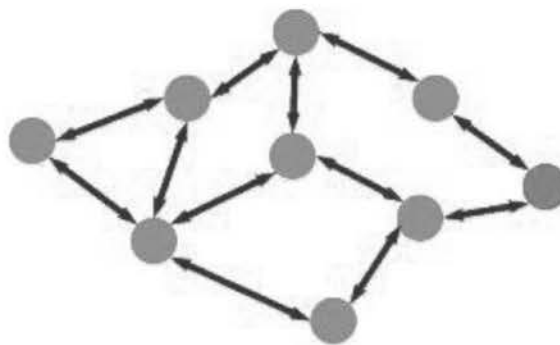


Рисунок 2.6. Структура тимчасової мережі

Ієрархічною мережею прийнято називати мережа, яка ділиться на кластери. Кожен кластер має маршрутизатор, який виступає в ролі головного вузла, і датчики, які є просто членами мережі (рис. 2.7). Маршрутизатор здійснює збір, обробку та передачу інформації, зібраної з усіх сенсорів кластера, тому він може швидко виходити з ладу через недостатнє живлення. Необхідно передбачати

енергетичну незалежність головного вузла при побудові структурованої мережі.

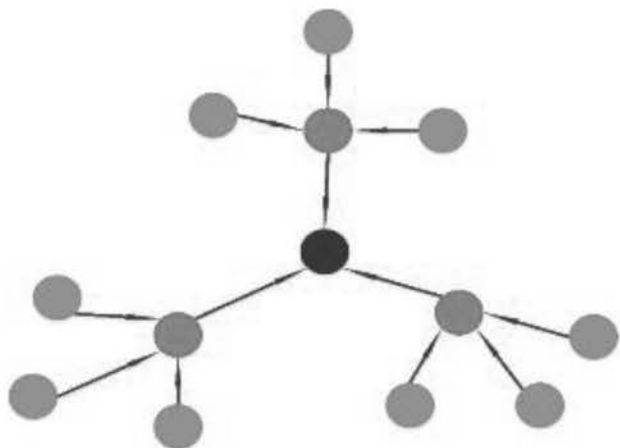


Рисунок 2.7. Структура ієрархічної мережі

Архітектура БТМ сенсорної мережі, яку представляє літаюча мережу, складається з трьох видів вузлів [9, 13]:

1. Координатор - обов'язковий і єдиний пристрій в мережі. Визначає маршрути для передачі інформації, задає параметри мережі, управляє пристроями, підключеними до мережі, вибирає необхідні частотні канали, а також відіграє роль шлюзу, щоб забезпечити вихід у зовнішню мережу. Залежно від додатків може виконувати різні додаткові функції, наприклад може бути концентратором або мережевим менеджером, який стежить за рівнем перешкод на обраному каналі і може здійснювати перехід всієї мережі на канал іншої частоти.

2. Маршрутизатор - пристрій, що відповідає за прийом, зберігання і передачу інформації між вузлами. Дозволяє здійснювати підключення кінцевих пристроїв до мережі і передає їм пакети з параметрами від координатора.

3. Сенсорний вузол (термінал) - сенсор або датчик, який збирає дані, наприклад показники температури, вологості, запиленості та т. д. Може керувати віддаленим об'єктом, якщо це необхідно. Сенсорний пристрій має мати маленький розмір, низьке енергоспоживання і можливість довго перебувати в сплячому режимі. У сукупності всі пристрої утворюють сенсорне поле, яке є

місцем моніторингу.

Однорангові мережі можуть бути представлені у вигляді топології «зірка» або «точка - точка» (P2P). При використанні топології «зірка» зв'язок встановлюється між кінцевими вузлами і координатором [19].

У топології «точка - точка» кожен пристрій може обмінюватися даними з будь-яким іншим в межах, обмежених радіоканалом.

Ієрархічна мережа може бути реалізована у вигляді кластерного дерева. Кінцеві пристрої підключаються до вузла, який здійснює роль маршрутизатора, який, в свою чергу, має підключення до координатора. Координатор може мати підключення з декількома кластерними групами (рис. 2.8).

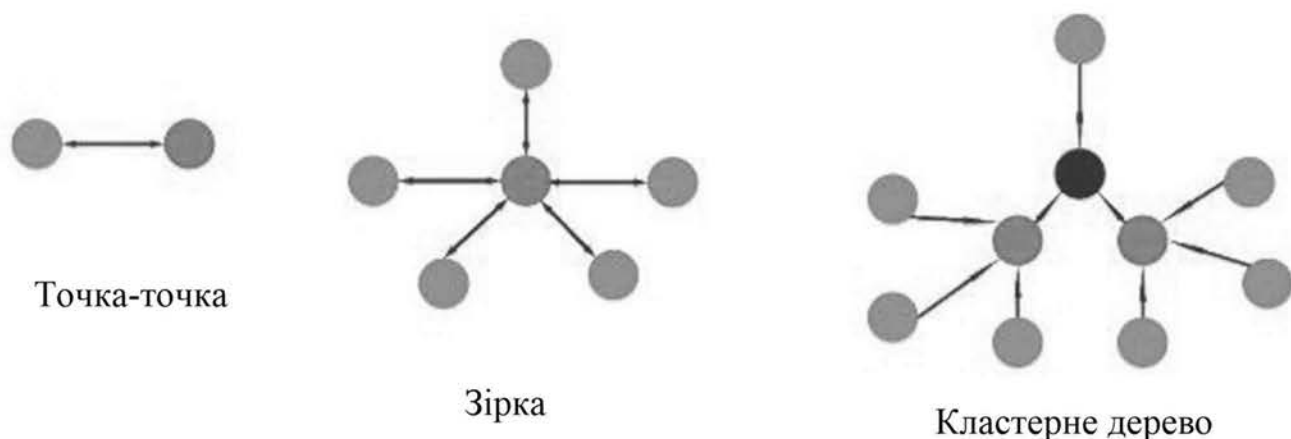


Рисунок 2.8. Компонування сенсорних мереж

2.4. Напрямки досліджень в області літаючих сенсорних мереж

Вище були розглянуті неієрархічні структури літаючих сенсорних мереж з одним або безліччю безпілотних літальних апаратів загального користування (наприклад, квадрокоптера), літаючих приблизно в одній площині. На наземній мережі при цьому розташовувалося також від 1 до m сенсорних полів.

В останні роки в рамках робіт щодо забезпечення зв'язком важкодоступних районів або для військових цілей було запропоновано використовувати нове

покоління висотних телекомунікаційних платформ (High Altitude Platform, HAP), а саме прив'язні аеростати, пов'язані з наземною інфраструктурою високошвидкісним кабелем (каналом). Таке рішення дозволяє забезпечити телефонним зв'язком, передачею даних, відеоспостереженням користувачів на досить великій території, проте не в змозі зібрати інформацію з розміщених на цій території сенсорних полів.

З огляду на обмежений час перебування РЛА в польоті, природним чином виникла задача про конвергенції HAP і літаючої сенсорної мережі. Так виникла ієрархічна структура ЛСМ, найпростіший варіант якої з двома рівнями ієрархії літаючого сегмента ЛСМ зображений на рис. 2.9. Дані структури в даний час практично не досліджені, а потрібно принаймні забезпечити раціональний вибір числа рівнів ієрархії і чисельні оцінки числа РЛА на кожному з них для збору інформації з наземних сенсорних полів і використання РЛА в інших завданнях висотної прив'язної платформи [9, 20].

ЛСМ і системи масового обслуговування

Подання РЛА як системи масового обслуговування з буфером в умовах мережі, толерантною до затримок (DTN), принципово вирішило питання про використання сучасних досягнень теорії телетрафіка для розрахунку характеристик ЛСМ і параметрів якості обслуговування і сприйняття. Однак наявність безлічі РЛА для вирішення завдань ЛСМ і безлічі сенсорних полів в умовах мереж, толерантних до затримок, вимагає проведення масштабних теоретичних досліджень в цій області.

Кластеризація наземного і літаючого сегментів.

Оптимізація маршруту збору даних

Оскільки сенсорні поля можуть складатися з дуже великого числа сенсорних вузлів, кластеризація, як правило, використовується для організації функціонування БТМ сенсорної мережі. Існує багато алгоритмів вибору головних

вузлів для сенсорних полів, розташованих на площині для стаціонарних і мобільних сенсорних вузлів. Проте, роботи в цьому напрямку тривають, і поява нових алгоритмів для наземних сенсорних полів може поліпшити характеристики ЛСМ. Алгоритмів вибору головних вузлів для сенсорних мереж в тривимірному просторі не так багато. З огляду на складність збору інформації за допомогою РЛА в тривимірному просторі, продуктивної здається ідея про те, що кластери повинні бути однаковими за розміром, що може полегшити завдання збору даних.

РЛА, які в основному будуть використовуватися для створення найближчого, а в ряді випадків і єдиного до поверхні землі літаючого фрагмента, мають вельми обмеженими можливостями по тривалості перебування в польоті. Тому вибір оптимального маршруту збору інформації представляється завданням першочергової ваги. Перші результати показують, що для вирішення такого завдання доцільно використовувати методи розв'язання задачі комівояжера, що, природно, пов'язано з великим обсягом обчислень.

Завдання управління ЛСМ

Тільки що зазначений потенційно великий обсяг обчислень для обмежених по енергоресурсах наземним сенсорним полях і самих РЛА підказує необхідність звернутися до досягнень в області програмно керованих мереж SDN (Software Defined Networks) для раціонального розподілу функцій між рівнями в ієрархічній ЛСМ. Дійсно, функції тимчасового головного вузла для кластерів може виконувати РЛА, а складні обчислення проводити, наприклад, НАР, при цьому вирішується так звана проблема розміщення SDN - контролера (Controller Placement Problem). Крім цього, можливо успадковувати для ЛСМ інструментарій систем управління безпеки SDN [2].

Ще одна досить велика група завдань управління в ЛСМ відноситься до розміщення сенсорних вузлів на сенсорних полях з РЛА, заміні і / або підзарядці сенсорних вузлів наземної мережі з їх же допомогою.

Модельна мережа і тестування ЛСМ

У практичному плані для забезпечення впровадження ЛСМ, як і інших мереж зв'язку, доцільно створити модельну мережу для тестування відповідності та сумісності. Оскільки ЛСМ є однією з складових Інтернету речей. Первісна структура модельної мережі приведена на рис. 2.10 [10].

Крім традиційних видів тестування, таких як відповідність, сумісність, бенчмаркінг, для тестування ЛСМ додається ще два нових види. Це тестування, толерантне до затримок, і тестування легальності.

3. ЛІТАЮЧА СЕНСОРНА МЕРЕЖА ЯК СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

3.1. Безпілотний літальний апарат як система масового обслуговування

Розвиток безпілотних літальних апаратів та інфраструктури розумних міст ставить безліч нових теоретичних і практичних завдань. Одне з них - побудова сенсорної мережі (що проникає всюди) як мережі, толерантною до затримок, із застосуванням безпілотних літальних апаратів (РЛА) в якості засобу доставки даних. Ця задача передбачає організацію взаємодії вузлів БСМ із засобами зв'язку РЛА з урахуванням особливостей їх руху.

Вузли БСМ деяким чином, в загальному випадку випадково, розподілені по території, що обслуговується. Припустимо, що кластеризація наземної мережі відсутня, а РЛА рухається по деякій заданій траєкторії. Тоді основний показник якості функціонування такої мережі - це час збору і доставки даних, буде залежати від швидкості руху літального апарату. Вибір швидкості руху обмежений як технічними характеристиками самого літального апарату, так і ймовірно-часовими характеристиками процесу обміну даними (повідомленнями) між засобами зв'язку РЛА і вузлами БСМ.

Можна припустити різні варіанти руху РЛА при виконанні завдання збору даних: рух з постійною швидкістю і рух із змінною швидкістю, яка залежить від характеру розподілу вузлів мережі. Другий варіант є більш загальним і може забезпечити різні вимоги до взаємодії з вузлами мережі. Ці вимоги також можуть бути також різні і в загальному випадку можуть бути визначені ймовірністю зчитування даних з вузла мережі [11].

Нижче будуть розглянуті особливості збору даних з сенсорної мережі одиночним РЛА і роєм РЛА.

Нехай сенсорні вузли мережі ЛСМ, наприклад, головні, розташовані на

РЛА, які здійснюють обліт території сенсорного поля (наземної БТМ сенсорної мережі), і проводять збір даних з наземних сенсорних вузлів (рис. 3.1).

Постановка задачі. Алгоритм вибору траєкторії руху РЛА передбачає, що його переміщення за час обміну даними з вузлом мережі $s = \tau_0 \cdot v$, де τ_0 - тривалість взаємодії з одним вузлом, а v - швидкість руху РЛА, дуже малий в порівнянні з радіусом зони обслуговування, тобто $\frac{\tau_0 \cdot v}{R} \rightarrow 0$.

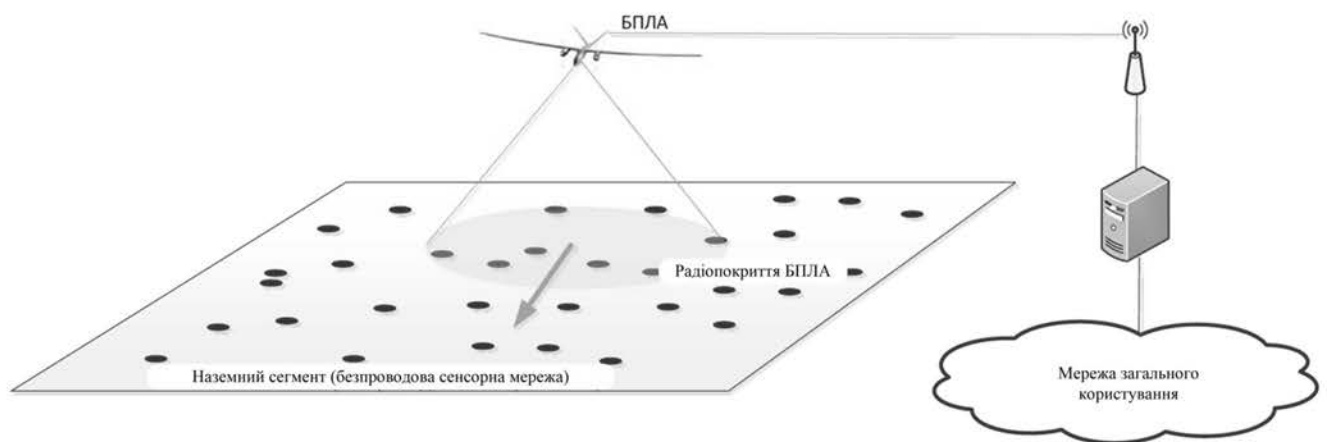


Рисунок 3.1. Доставка даних з вузлів сенсорної мережі в МСО

При кінцевому R ця умова виконується для всіх вузлів мережі, що знаходяться в зоні обслуговування тільки при $v \rightarrow 0$ або $t \rightarrow 0$, тобто при нерухомості РЛА в точці зняття даних або миттєвому зчитуванні даних. Якщо $v > 0$ і $t_0 > 0$ і передбачається такий стан, що на кордоні зони обслуговування (рис. 3.2), протилежної напрямку руху, знаходяться вузли мережі, то вони не зможуть бути обслужені, т. я. час їх перебування в зоні t_c дорівнюватиме нулю.

Виходячи з часу знаходження вузла в зоні обслуговування, можна визначити межу області, перебуваючи в якій вузол буде обслужений при заданій швидкості руху РЛА. Мінімальний час одно сеансу обслуговування τ_0 , отже, відстань до кордону рівна $S_c = v \cdot \tau_0$.

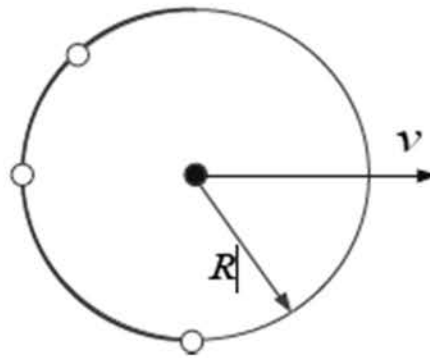


Рисунок 3.2. Не обслуговуємі вузли на кордоні зони обслуговування БПЛА при $v >$

0

Область, вузол з якої може бути обслужений за час τ_0 , показана на рис. 3.3.

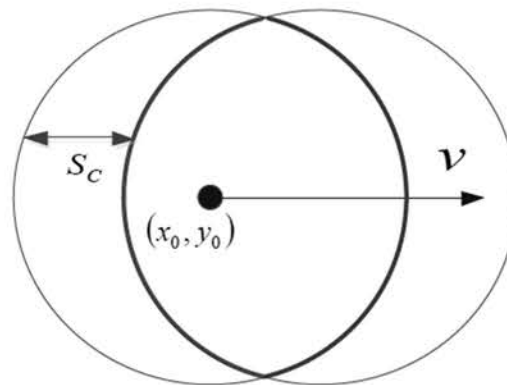


Рисунок 3.3. Область обслуговування РЛА при $v > 0$

Таким чином, якщо в певний момент часу t РЛА повинен провести сеанс зв'язку, рухаючись зі швидкістю v , слід вибрати вузол з зазначеній галузі. Вузол, що лежить лівіше даної області, не зможе бути обслужений. Наведені міркування справедливі при розгляді одного вузла. Якщо в радіусі дії РЛА знаходиться безліч вузлів, то на їх обслуговування буде потрібно більше, ніж τ_0 , час, що вимагає окремого розгляду [11, 21].

При обслуговуванні безлічі вузлів РЛА можна розглядати як систему масового обслуговування, на вхід якої надходять заявки (вузли, що потрапляють в зону обслуговування), які можуть очікувати обслуговування протягом часу їх

перебування в зоні доступності. Заявки (вузли), що не були обслужені протягом цього часу, отримують відмову. Інтенсивність потоку залежить від радіуса зони обслуговування, щільності вузлів і швидкості руху РЛА. Для обслуговування вузла РЛА витрачає деякий час, протягом періоду обслуговування вузол повинен перебувати в зоні доступності (рис. 3.4).

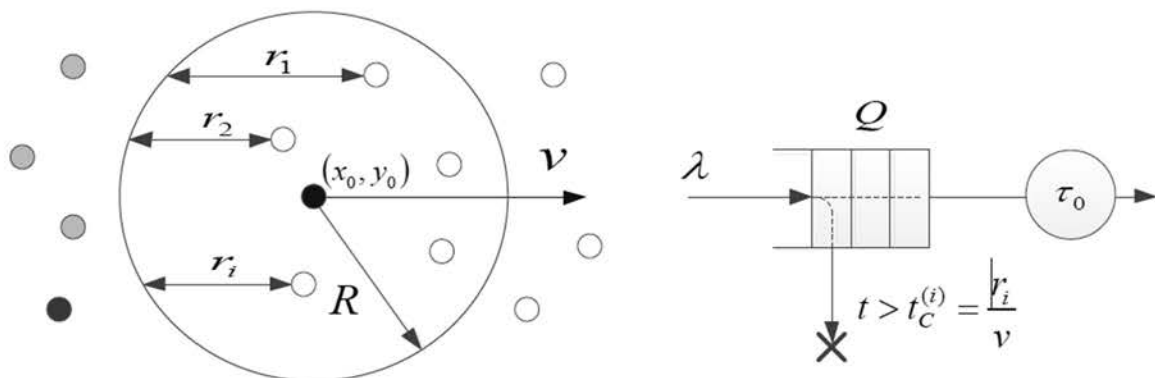


Рисунок 3.4. РЛА як система масового обслуговування

Завдання обслуговування безлічі вузлів доцільно розглянути для двох типових випадків.

У першому випадку координати вузлів відомі. У цьому випадку на вхід системи надходить детермінований потік заявок. Оптимізація функціонування такої системи зводиться до вибору правила (розкладу) обслуговування вузлів.

У другому випадку координати вузлів не відомі. На вхід системи надходить випадковий потік заявок. Для вибору режиму роботи такої системи потрібно визначити залежність ймовірності відмови в обслуговуванні від її параметрів.

Рішення при відомих координатах вузлів (детермінований потік заявок)

Нехай в деякий момент часу в зазначеній галузі зони обслуговування знаходиться декілька вузлів, тоді при швидкості переміщення v максимальне кількість вузлів, які, потенційно, можуть бути обслужені, визначається часом переміщення РЛА на відстань R :

$$k_{MAX} = \left\lfloor \frac{R}{v \cdot \tau_0} \right\rfloor. \quad (3.1)$$

Однак це тільки потенційно можливе число. Наприклад, якщо припустити, що всі ці вузли лежать на лівій межі зазначеної області, то буде можливо обслужити лише один з них (рис. 3.5 а). Але якщо вони знаходяться на прямій, що проходить через центр зони обслуговування і збігається з напрямком руху РЛА, а також розташовані через інтервали $\frac{R}{v} \cdot \tau_0$, то тоді всі ці вузли можуть бути обслужені (рис. 3.5 б).

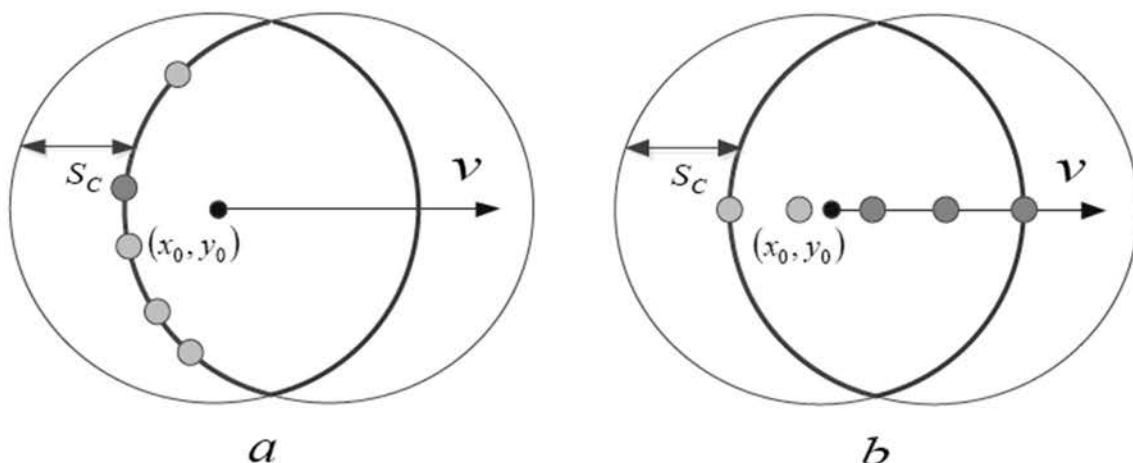


Рисунок 3.5. Різне розміщення вузлів в зоні обслуговування

Зрозуміло, що це можливо тільки в тому випадку, якщо обслуговування почати з останнього, найближчого до лівої межі зони обслуговування, вузла. Якщо почати обслуговування з першого (крайнього правого) вузла, то число обслужених вузлів буде менше, тому що частина з них за час обслуговування першого і наступних вузлів покине зону обслуговування. Таким чином, число обслужених вузлів залежить від часу їх перебування в області, тобто від їхнього економічного становища і черговості обслуговування.

Нехай в області знаходиться k вузлів, при цьому час перебування кожного з них в ній рівний

$$\xi_i = \frac{r_i}{v}, \quad (3.2)$$

де r_i - відстань від вузла до кордону області i -го вузла.

На обслуговування кожного з них потрібен час τ_0 . Потрібно вибрати черговість обслуговування, при якій кількість обслугованих вузлів максимально. Вважаємо, що обслуговування починається в момент часу $t_1 = 0$, одночасно обслуговуватися може тільки один вузол, тоді час початку обслуговування j -го по рахунку вузла одно $t_j = (j-1) \cdot \tau_0$.

Для виконання завдання потрібно визначити таку черговість обслуговування вузлів, при якій було б обслуговано їх максимальну кількість. Це завдання можна вирішити, звівши її до задачі про призначення. Її рішення вимагає час $O(n^3)$, що в реальній ситуації (для реального числа вузлів в зоні обслуговування) цілком допустимо.

Рішення при невідомих координатах вузлів (випадковий потік заявок)

При невідомих координатах вузлів на вхід системи надходить випадковий потік заявок (вузлів). Властивості цього потоку визначаються властивостями сенсорного поля (розміщенням вузлів на поверхні), радіусом обслуговування РЛА і швидкістю його руху. Зробимо наступні припущення:

- сенсорне поле являє собою пуассонівське поле;
- будемо вважати, що РЛА рухається прямолінійно з постійною швидкістю v ;
- зона обслуговування являє собою коло з радіусом R .

1. Функція розподілу вхідного потоку заявок

Визначимо функцію розподілу для вхідного потоку заявок. Для цього

розглянемо зону обслуговування РЛА в момент часу 0 і в момент часу t . За час t в систему надійдуть ті заявки (вузли), які знаходяться в області, зображеної на рис. 3.6. Згідно властивостями пуассонівського поля, ймовірність того, що в деякій області знаходиться n точок (вузлів), визначається розподілом Пуассона і залежить тільки від площі цієї області (рис. 3.7).

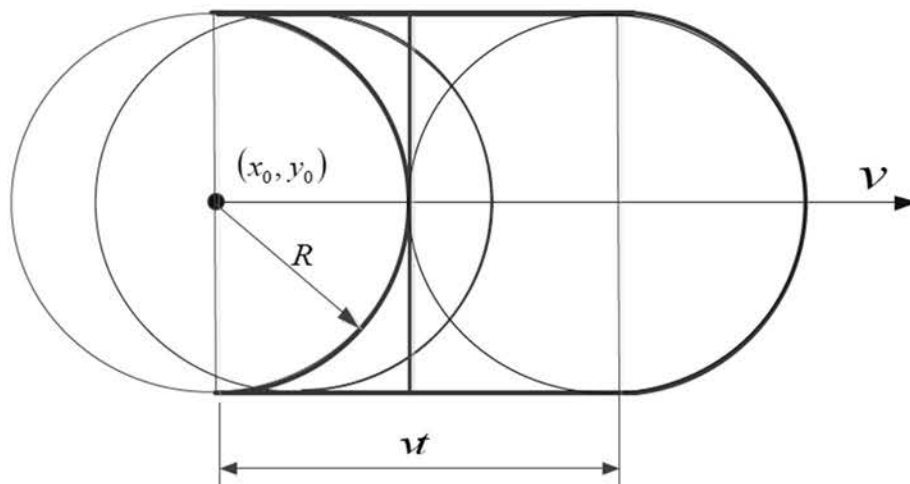


Рисунок 3.6. Імовірність попадання n вузлів в область S

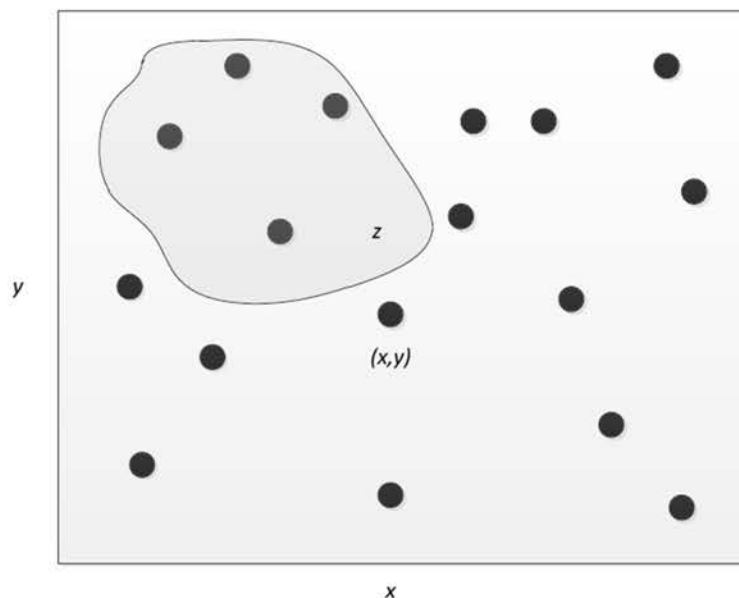


Рисунок 3.7. Представлення області, в якій знаходяться сенсорні вузли
Імовірність того, що в області S виявляться m заявок (вузлів), дорівнює

$$p_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (3.3)$$

де $a = \rho \cdot S$;

ρ - число точок (вузлів) на одиницю площі;

$S(t)$ - площа області

$$p_m(t) = \frac{(\rho \cdot S(t))^m}{m!} e^{-\rho \cdot S(t)}, \quad (3.4)$$

Площа області, зображеної на рис. 3.8, дорівнює:

$$S(t) = 2R \cdot vt. \quad (3.5)$$

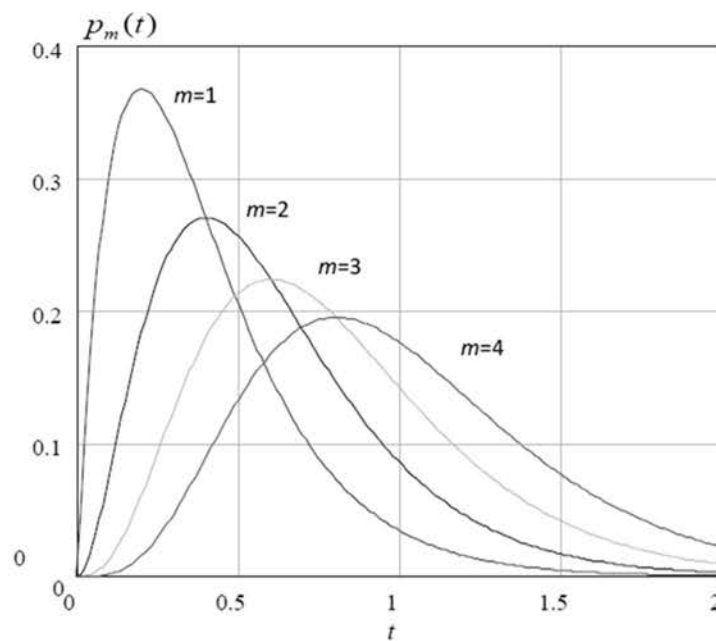


Рисунок 3.8. Функція розподілу числа заявок

Інтенсивність потоку, тобто середня кількість заявок за одиницю часу, складе

$$\lambda = \rho \cdot 2R \cdot v. \quad (3.6)$$

Далі проаналізуємо розподіл інтервалу часу між заявками. Розглянемо

випадкову величину T - проміжок часу між двома сусідніми подіями в потоці - і знайдемо її функцію розподілу [12].

$$F(t) = P(T < t). \quad (3.7)$$

Тоді ймовірність того, що на ділянці часу довжиною t надійде m заявок, дорівнює:

$$P(T \geq t) = 1 - F(t). \quad (3.8)$$

Тому ймовірність можна обчислити за формулою:

$$P(T \geq t) = p_0(t) = e^{-\rho \cdot 2R \cdot vt}. \quad (3.9)$$

Функція розподілу інтервалу часу між заявками має наступний вигляд (рис. 3.9):

$$F(t) = 1 - e^{-\rho \cdot 2R \cdot vt}. \quad (3.10)$$

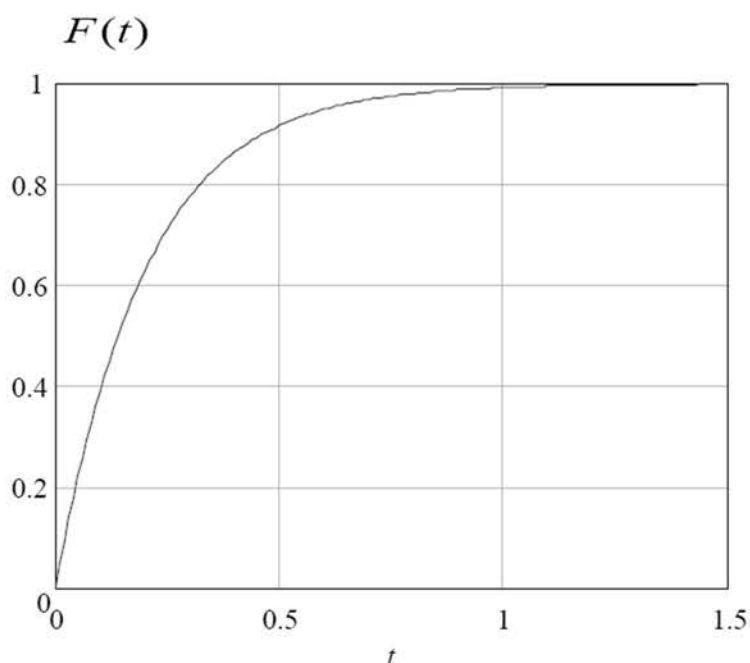


Рисунок 3.9. Функція розподілу інтервалу часу між заявками

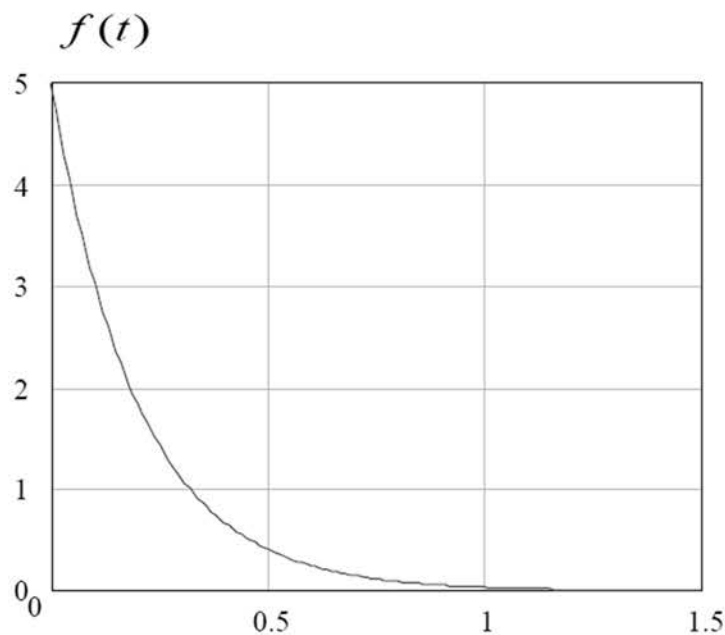


Рисунок 3.10. Щільність ймовірності інтервалу часу між заявками t

Знайдемо щільність ймовірності (рис. 3.10):

$$f(t) = 2\rho Rv \cdot e^{-\rho 2\rho Rv \cdot t} \quad (3.11)$$

Таким чином, на вхід системи надходить найпростіший потік, інтервали часу між заявками в якому розподілені за експоненціальним законом з середнім значенням:

$$\bar{a} = \frac{1}{\rho \cdot 2R \cdot v} \quad (3.12)$$

і дисперсією

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{4(\rho 2Rv)^2} \quad (3.13)$$

Якщо допустити, що час перебування вузла в зоні обслуговування не обмежена, для оцінки величини втрат можна застосувати відоме співвідношення

$$P = \frac{1-\rho}{1-\rho \frac{C_a^2+C_b^2}{2}^{K+1}} \rho^{\frac{2}{C_a^2+C_b^2}K}, \quad (3.14)$$

де $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot t_0$;

C_a - коефіцієнт варіації інтервалу часу між заявками;

C_b - коефіцієнт варіації часу обслуговування;

K - число місць очікування в черзі.

В даному випадку $C_a = 1$, а $C_b = 0$, з урахуванням цього

$$P = \frac{1-\rho}{1-\rho^{2K+1}} \rho^{2K}. \quad (3.15)$$

На рис. 3.11 представлено вплив щільності розподілу вузлів наземної мережі на ймовірність втрат.

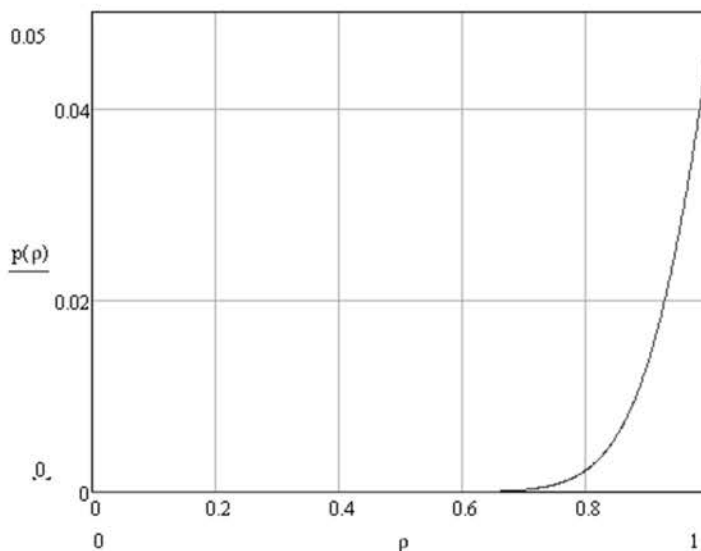


Рисунок 3.11. Вплив щільності вузлів на ймовірність втрат

Наведені вище міркування показують, що в разі, коли розташування вузлів

сенсорної мережі може бути описано пуасонівським полем, модель взаємодії РЛА з БСМ може бути описана моделлю СМО з комбінованої дисципліною обслуговування (очікуванням і втратами), на вхід якої надходить найпростіший потік заявок [22, 23]. У загальному випадку, при довільному характері розміщення вузлів, для опису якості обслуговування вузлів (ймовірності втрат) потрібно оцінити коефіцієнти варіації інтервалів часу між заявками (моментами попадання вузлів в зону дії РЛА) і часу обслуговування заявки (часу передачі даних). Вважаючи, що час обслуговування має експоненціальне розподіл, розглянута модель може бути записана як $M(\rho, R, \nu) / M / 1$.

3.2. Модель фрагмента літаючої сенсорної мережі для передачі даних на великі відстані

З урахуванням аналізу типових структур побудови ЛСМ була розроблена архітектура мережі передачі даних на великі відстані (рис. 3.12), що складається:

1) з наземного сегмента ЛСМ, що складається з безлічі сенсорних вузлів, об'єднаних в бездротову сенсорну мережу;

2) літаючого сегмента ЛСМ, що включає в себе:

- безпілотний літальний апарат (РЛА-шлюз БСМ - LPWAN),

здійснює збір даних з наземного сегмента мережі і подальшу передачу даних на базі технології LoRa; фактично обладнання, встановлене на РЛА, грає роль шлюзу 6 LoWPAN - LoRa;

- групи безпілотних літальних апаратів (РЛА-повторювач), що виконують ретрансляцію даних на базі технології LoRa для подальшої доставки до шлюзу з IP -мережі;

3) базової станції мережі LPWAN - Інтернет (LoRa - IP базова станція).

У даній архітектурі безпілотний літальний апарат, з встановленим на ньому пристроєм, який виконує роль шлюзу, є вузлом, що збирає дані з наземного сегмента мережі. У зв'язку з невеликою тривалістю польоту РЛА загального користування і великою відстанню до LoRa - IP базова станція потрібно організувати канал передачі даних в реальному часі. Для організації такого каналу використовуються проміжні РЛА, що знаходяться в різних точках між РЛА-шлюз БСМ - LPWAN і базовою станцією LoRa - IP базова станція. UAV - gateway БСМ - LPWAN, що виконує роль шлюзу, перетворює дані з БСМ і передає їх на найближчий ретранслює вузол РЛА-повторювач. Далі відбувається передача даних на LoRa - IP базова станція через мережу ретранслюють РЛА (БПЛ А-повторювач), об'єднаних між собою по радіоканалу за допомогою модулів LPWAN [24, 25].

Як технології передачі даних для наземного сегмента ЛСМ розглянута IEEE 802.15.4 як найбільш поширена в задачах збору інформації з сенсорних полів. Як приклад можна привести протоколи, що використовують стандарт IEEE 802.15.4: ZigBee, 6 LoWPAN, Thread, RPL і ін.

Як протоколу для ретрансляції даних були обрані протоколи далекої передачі даних LPWAN, засновані на технології IEEE 802.15.4 g.

Як приклад протоколів, заснованих на IEEE 802.15.4 g, можна привести LoRa, SigFox, «Стриж» та ін [25].

Аналітична модель

Аналітична модель повинна описувати основні показники якості функціонування мережі, в якості яких виберемо ймовірність втрат пакетів і затримку доставки даних. Ці показники залежать від процесів доставки даних, які виконуються на рівнях мережі від фізичного до мережевого. Тому модель повинна описувати ці рівні в достатній для практичного застосування ступеня.

Мережевий рівень

Маршрут доставки пакетів даних в мережі між джерелом даних S і вузлом

призначення D містить кілька ділянок (транзитів) k , утворених парами приймачів в вузлах зв'язку (РЛА) (рис. 3.13).

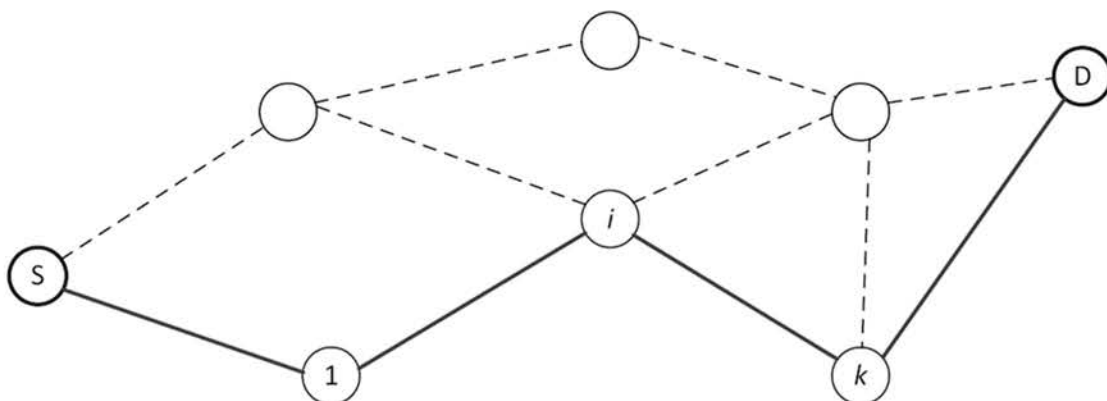


Рисунок 3.13. Модель маршруту доставки пакета даних

На даному рівні параметром моделі є тільки число транзитів k . Логіка вибору маршруту далі в моделі не враховується.

Канальний рівень

Кожен з транзитних вузлів містить буфер для зберігання деякого (обмеженого) обсягу прийнятих даних, що підлягають передачі на наступний вузол маршруту. Модель вузла (ділянки маршруту) може бути представлена як система масового обслуговування з комбінованою дисципліною обслуговування (затримкою і втратами). Маршрут в цілому являє собою багатофазну систему масового обслуговування, утворену послідовністю моделей окремих ділянок (рис. 3.14) [13].

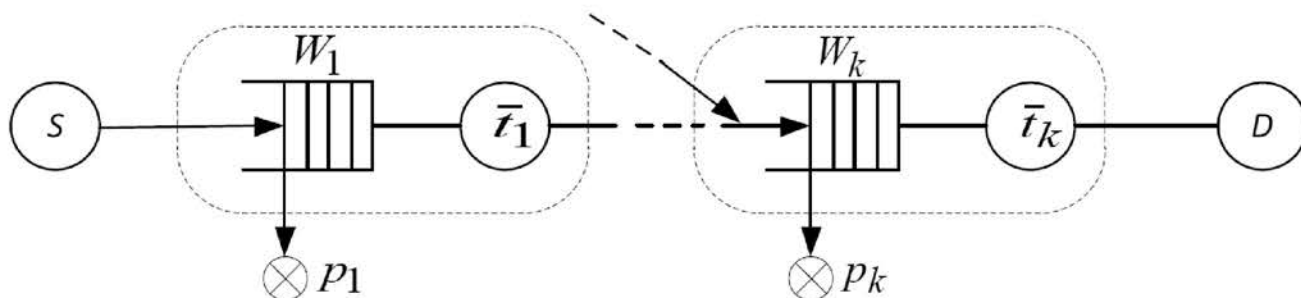


Рисунок 3.14. Модель маршруту доставки пакета даних як багатофазної СМО

Імовірність втрати пакета на маршруті може бути визначена як:

$$p = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i), \quad (3.16)$$

де p_i може бути визначена, як $(G(\rho, R, v) / G / 1 / n_b)$:

$$p = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i), \quad p_i = \frac{1 - \rho}{1 - \rho - \frac{2}{c_a^2 + c_s^2} n_b^{b+1}} \rho^{\frac{2}{c_a^2 + c_s^2} n_b}, \quad (3.17)$$

де c_a^2 і c_s^2 - квадратичні коефіцієнти варіації відповідно розподілів вхідного потоку і часу обслуговування для i -го вузла; n_b - розмір буфера; ρ - завантаження i -го вузла.

Для отримання наближеної оцінки середнього часу доставки пакета різних потоків скористаємося виразом:

$$T_i \approx \frac{\rho \bar{t}}{2(1 - \rho)} \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left(\frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{a^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t}, \quad (3.18)$$

де σ_a^2 і σ_s^2 - дисперсії інтервалів часу між пакетами і часу обслуговування i -го вузла відповідно;

\bar{a} - середнє значення інтервалу між пакетами i -го вузла;

\bar{t} - середній час обслуговування i -го вузла.

Для отримання наближеної оцінки середнього часу доставки пакета різних потоків скористаємося виразом $(G(\rho, R, v) / G / 1)$. Використовуючи відомий вислів (3.13) для T_i час доставки на маршруті дорівнюватиме:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (3.19)$$

Моделі (3.16), (3.17), (3.18) і (3.19) дають наближену оцінку ймовірності втрат пакетів і середнього часу доставки пакета від джерела даних S до вузла призначення D. У даній моделі передбачається, що відомі оцінки середнього часу передачі пакету на кожній з ділянок маршруту \bar{t}_i . Цей час залежить від швидкості передачі даних на ділянці і розмірів пакетів. Швидкість передачі даних на ділянці, в свою чергу, залежить від умов поширення радіосигналу і може бути описана однією з відомих моделей.

$$\bar{t}_i = \frac{\bar{L}}{br_i}, \quad (3.20)$$

де \bar{L} - середня довжина пакета (біт);

br_i - швидкість передачі даних на i -му ділянці (біт / с).

Фізичний рівень

У загальному випадку на даному рівні слід розглядати процеси, що впливають на умови поширення сигналу, такі як загасання в середовищі поширення, завмирання сигналу в каналі і різного роду перешкоди, що впливають на умови поширення. Для спрощення моделі на даному рівні зв'яжемо швидкість передачі даних в каналі тільки з відстанню між вузлами.

Фактор відстані

Згідно зі специфікацією LoRaWAN, швидкість передачі залежить від рівня сигналу на вході приймача, як показано в табл. 3.1 [13].

Таблиця 3.1.

Залежність швидкості передачі від рівня сигналу на вході приймача

Рівень сигналу, дБм	вид модуляції	Швидкість передачі даних, біт / с
-122	GFSK	50 000
-120	LoRa	10 937

-123	LoRa	5468
-126	LoRa	3125
-129	LoRa	1757
-132	LoRa	976
-135	LoRa	537
-137	LoRa	292

Рівень сигналу на вході приймача опишемо як:

$$P_{RX} = P_{TX} - A(d) \text{ дБм}, \quad (3.21)$$

де P_{TX} - потужність на виході передавача (дБм);

$A(d)$ - залежність загасання сигналу від відстані (дБ).

В якості моделі загасання виберемо модель.

$$A(d) = 201g\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \text{ дБ}, \quad (3.22)$$

де λ - довжина хвилі (м);

d - відстань між приймачем і передавачем (м).

Вважаємо, що застосовуються антени мають одиничні коефіцієнти підсилення (0 дБ).

Тоді, згідно з табл. 3.1, залежність швидкості передачі від рівня сигналу буде мати вигляд ступінчастої функції, наведеної на рис. 3.15.

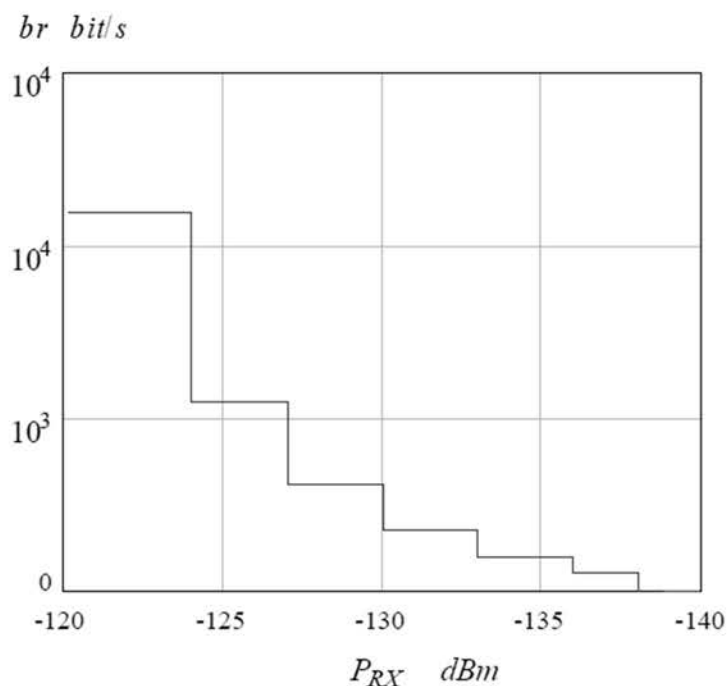


Рисунок 3.15. Залежність швидкості передачі від рівня сигналу на вході приймача

Так як чутливість радіоприймальних пристроїв LoRa, згідно специфікації, забезпечує прийом сигналу з малим рівнем сигналу (-137 дБм), а загасання сигналу оцінюється згідно (3.37), то потенційні відстані передачі сигналу великі настільки, що необхідно враховувати кривизну землі і висоти підйому антенних пристроїв (висоту польоту РЛА). Відстань прямої видимості може бути визначено як:

$$d_{\max} = 3,57 \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} \right), \quad (3.23)$$

де h_1 і h_2 - висоти антен (м).

Врахуємо швидкі завмирання в каналі, ввівши емпіричний коефіцієнт збільшення загасання $\gamma = 1.1$. Тоді, з урахуванням (3.22), (3.23) і введеного коефіцієнта, залежність швидкості передачі від відстані буде мати вигляд, наведений на рис. 3.16 [14].

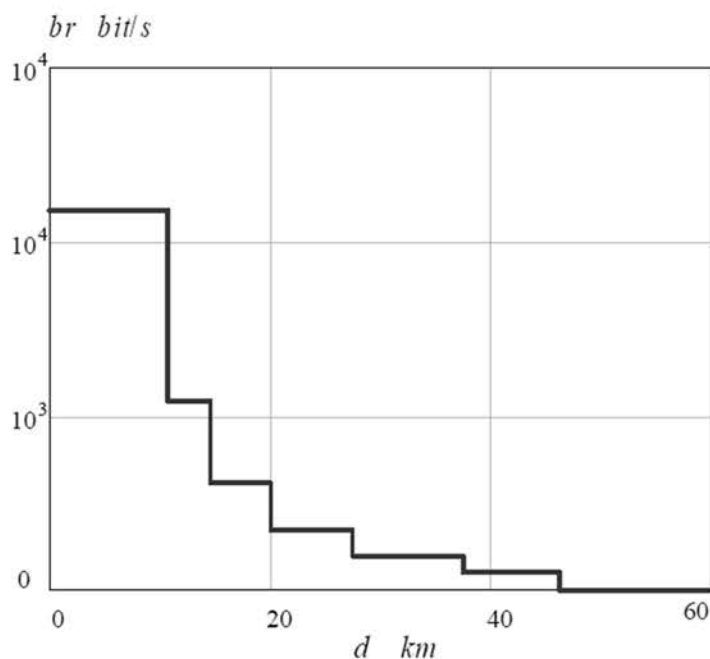


Рисунок 3.16. Залежність швидкості передачі від відстані між приймачем і передавачем (при висотах антен $h_1 = h_2 = 100$ м)

Таким чином, запропонована модель дозволяє встановити залежність часу обслуговування пакета в вузлах зв'язку (часу передачі по каналах), затримки на очікування та ймовірності втрат пакетів від параметрів маршруту (відстані між вузлами і числа транзитів).

Імітаційна модель літаючої сенсорної мережі

За допомогою вищеописаної архітектури була розроблена імітаційна модель передачі даних з БТМ сенсорної мережі в Інтернет. На основі попередніх досліджень на модельній мережі були отримані вихідні дані для розробки імітаційної моделі. Так, обсяг переданих даних з БТМ сенсорної мережі становить 10 Мбайт. Ці дані необхідно передати по ЛСМ на відстань 120 км. Літаюча сенсорна мережа в моделі представлена у вигляді системи масового обслуговування. Робота була виконана за допомогою пакета імітаційного моделювання AnyLogic. Модель описує залежність кількості доставлених пакетів і затримок передачі пакетів до базової станції від швидкості передачі даних. Обмеження за часом роботи РЛА не враховуються.

В імітаційній моделі використані параметри функціонування модулів LPWAN Semtech SX тисячу двісті сімдесят два.

Модуль Semtech SX 1272 має наступні характеристики:

1. Пропускна здатність (в режимі модуляції LoRa): 240-32 600 біт / с.
2. Дальність дії: до 20 км (на відкритій місцевості, без підтверджень доставки).
3. Чутливість приймача (RSSI): -117...- 137 дБм.
4. Потужність приймача: 10-20 дБм.
5. Розмір пакета даних: 30-256 байт.
6. Робоча частота: 860-1020 МГц.

Наведені вище характеристики були використані для побудови моделі пристрою ретрансляції LPWAN. Зокрема, були отримані залежності RSSI від відстані і залежності швидкості передачі даних від RSSI.

Розроблена імітаційна модель складається з наступних елементів (рис. 3.20):

- 1) source - джерело заявок, що імітує роботу наземного сегмента ЛСМ;
- 2) gateway - агента, що імітує роботу шлюзу БСМ - LPWAN;
- 3) module 802_15_4 g - агента, що імітує роботу пристроїв, що ретранслюють LPWAN;
- 4) sink - точки призначення заявок, грає роль базової станції.

Також в моделі використовуються елементи selectOutput (selectOutput 1 - selectOutput 4), що використовується для імітації вибору каналу зв'язку LPWAN, по критеріям завантаженості буфера і показника RSSI суміжного пристрою. Розрахунок даних критеріїв відбувається в агента «module 802_15_4 g» (рис. 3.17).

В цієї моделі «module 802_15_4 g», що імітує роботу ретранслюють пристрої LPWAN, об'єднані в ланцюжок з 19 об'єктів (рис. 3.18). Пакет даних від моменту надходження в систему масового обслуговування до моменту прибуття в точку призначення долає 12 вузлів, типу «module 802_15_4 g». Розмір пакета обраний 30 байт. Відстань між ними є динамічною величиною і варіюється в

межах 1 км від початку встановлених координат. Як говорилося раніше, відстань, на яку необхідно передати дані, складає 120 км. Швидкість передачі постійна протягом всього часу передачі. Режим передачі даних: без підтверджень і перезапиту.

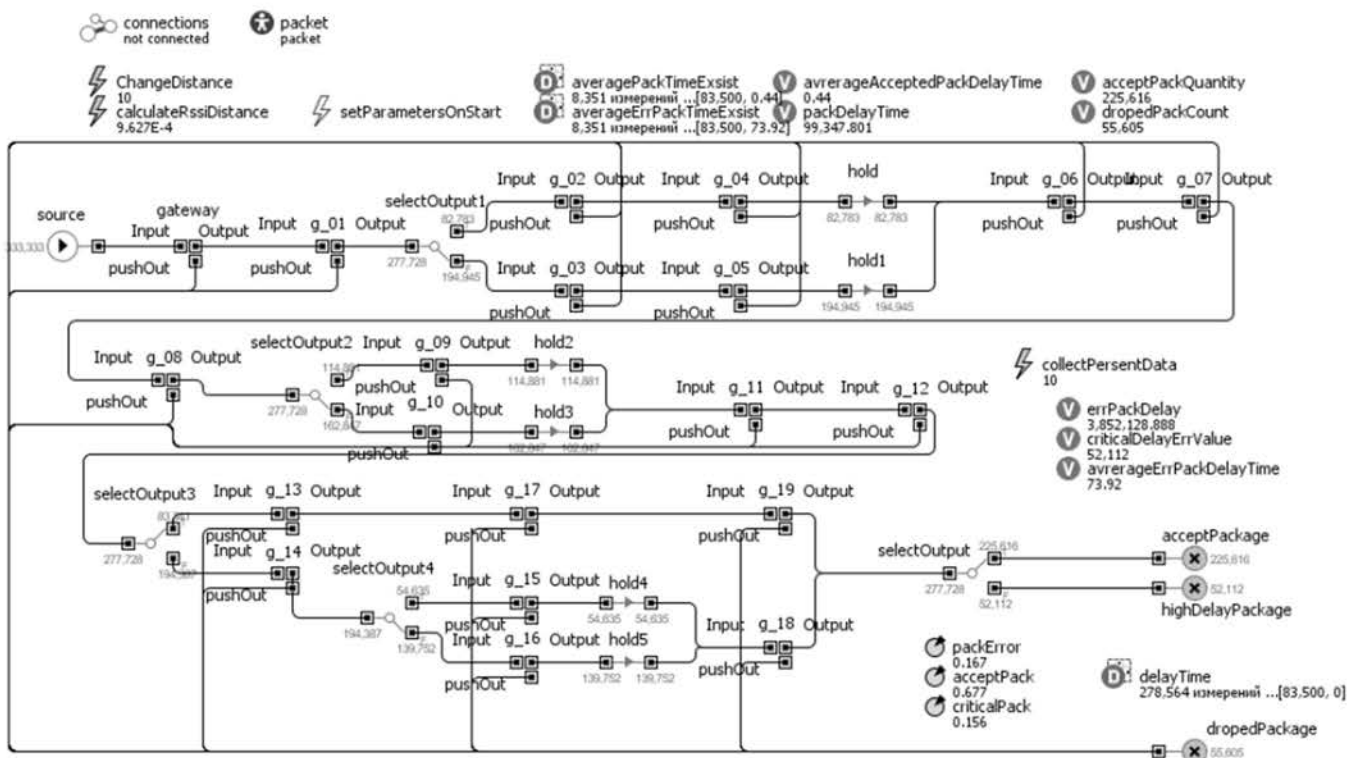


Рисунок 3.17. Імітаційна модель ЯСС

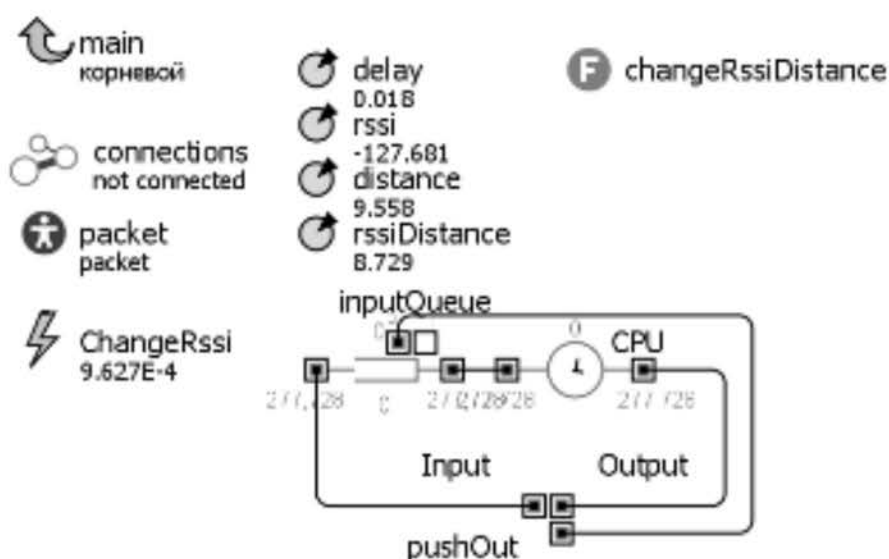


Рисунок 3.18. Імітаційна модель агента «module 802_15_4 g»

Для розрахунку показника RSSI для пристроїв ретрансляції LPWAN використовується формула [15]:

$$RSSI = 10 \log \left(P * \left(\frac{\alpha}{4\pi d} \right) \right), \quad (3.28)$$

де RSSI - показник рівня сигналу (дБм);

P - вихідна потужність сигналу в приймачі (дБм);

α - довжина хвилі сигналу (м);

d - відстань (м).

Комп'ютерні експерименти були виконані для десяти різних показників смуги пропускання вихідного потоку, згідно пороговим значенням смуги пропускання модуля LPWAN. Кількість переданих пакетів, відповідних 10 Мбайт пам'яті, що дорівнює 333 333 пакетів. Результати серії комп'ютерних експериментів наведені нижче (табл. 3.2).

Результати імітаційного моделювання

№	Швидкість передачі даних, біт / с	Прийняті пакети, %	Втрачені пакети, %	Затримки, з	Час роботи моделі, з
1	32 600	8,78	91,22	18,44	2491
2	24 800	10,95	89,05	19,31	3332
3	18 400	15,27	84,73	18,43	4412
4	16 200	17,12	82,88	18,72	5010
5	12 800	21,54	78,46	18,89	6280
6	9600	26,29	73,71	20,68	8431
7	2400	58,50	41,50	19,56	33 380
8	960	83,32	16,68	14,23	83 417
9	480	90,41	9,59	13,74	166 720
10	240	96,06	3,94	12,67	333 354

На рис. 3.19 наведена залежність швидкості передачі даних від втрат. Згідно з цим графіком можна зробити висновок, що оптимальна швидкість передачі даних для мереж з даної архітектурою становить 240-480 біт / с, що дозволяє передати дані з допустимим рівнем втрат (для пристроїв IEEE 802.15.4 g). Величина втрат пов'язана з великим числом вузлів і постійно змінюється пропускнуною спроможністю для пристроїв LPWAN, яка, в свою чергу, пов'язана зі зміною відстані між пристроями і значення параметра RSSI [25].

На рис. 3.20 наведена залежність мережевий затримки при доставці пакетів від швидкості передачі даних. Згідно з цим графіком можна зробити висновок, що рівень мережевої затримки стає найменшим при швидкості передачі даних 240

960 біт / с, що пов'язано з меншим часом очікування пакетів в буфері пристроїв LPWAN. Мережеву затримку можна зменшити, ввівши в імітаційну модель модуля LPWAN час тайм-ауту, що збільшить рівень втрат, але зменшить мережну затримку. В даному випадку мережа можна вважати толерантною до затримок в зв'язку з невизначеними вимогами щодо передачі даних через мережу.

Згідно з отриманими результатами можна зробити висновок, що найбільш оптимальною швидкістю передачі даних для мережі з вищеописаної архітектурою і сценарієм роботи є 240-480 біт/с. На даних швидкостях передачі даних спостерігається найменша затримка (11-14 с) і з прийнятним рівнем втрат пакетів (3-10%).

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі на підставі аналізу ряду новітніх технологій в сфері телекомунікацій встановлено, що в даний час сформувалася концепція розвитку мереж зв'язку на середньострокову до 2025 року і довгострокову до 2030 року перспективу, відома як концепція Інтернету речей. Відповідно до основних засад концепції за короткий час з'являються все більш нових додатків, принципово змінюється архітектура, характер взаємозв'язків пристроїв і можливості мереж зв'язку, покращується якість та розширюється спектр послуг, що надаються користувачам.

В якості мережі, яка могла б повною мірою реалізувати основні положення концепції Інтернету речей, в даний час розглядається мережа зв'язку п'ятого покоління, основними особливостями якої здатна забезпечити функціонування телекомунікацій в умовах надщільного розміщення терміналів мережі і ультрамалих затримок, а також обслуговувати взаємодії «пристрій - пристрій» D2D.

Основними новими додатками мереж зв'язку п'ятого покоління в даний час є: Інтернет речей, Тактильний Інтернет, Доповнена реальність і літаючі мережі.

У магістерській роботі досліджено комплекс моделей і методів аналізу ЛСМ (літаючих сенсорних мереж), побудованих з використанням РЛА загального користування на основі протоколів БТМ сенсорних мереж ZigBee, 6LoWPAN, Thread, RPL і протоколів маловживаючих мереж сімейства LPWAN. Розглянути типову структуру, можливі варіанти архітектури та напрямки перспективних досліджень в цієї сфері. Таким чином практично зроблено певний внесок у розвиток нового класу сенсорних мереж які є частиною МСО і призначені для надання нових послуг як користувачам МСО, так і пристроїв літаючих мереж при міжмашинної взаємодії M2M.

Певні нароби досягнути у розроблені моделі безпілотного літального апарату, що відрізняється від відомих тим, що РЛА представляється як система масового обслуговування і при цьому враховуються: параметри швидкості

переміщення РЛА, висоти його прольоту і щільності сенсорної мережі.

Характер взаємодії РЛА з вузлами БСМ може бути описана засобами теорії масового обслуговування, при цьому основні її характеристики будуть залежать від розподілу вузлів по території, часу взаємодії з вузлами мережі, радіуса обслуговування і швидкості руху РЛА.

В ході дослідження встановлено, що час доставки даних користувачеві в БСМ при використанні РЛА в якості засобу доставки залежить від швидкості руху літальних апаратів, часу зчитування даних (часу взаємодії з вузлом мережі) і щільності вузлів на території, що обслуговується.

При відомих координатах вузлів БСМ розглядається версія детермінованого потоку заявок, оптимізація обслуговування якого може бути досягнута складанням розкладу обслуговування вузлів мережі. При невідомих координатах розміщення вузлів БСМ ситуація може розглядатися у якості системи масового обслуговування з відходом заявок з черги (при обмеженому часі очікування).

У магістерській роботі розроблено модель для рою безпілотних літальних апаратів, що відрізняється від відомих тим, що рій РЛА представляється як мережа масового обслуговування, а основною характеристикою моделі є середня тривалість передачі інформації між елементами рою. Отримано відповідні характеристики для роїв, що мають форми куба і кулі.

Також розроблено метод використання РЛА з метою збільшення зв'язності наземних сегментів, що відрізняються від відомих тим, що РЛА використовуються для збільшення зв'язності БТМ натільних мереж WBAN.

Запропонована модель фрагмента літаючої сенсорної мережі для передачі даних на великі відстані. В результаті проведення серії комп'ютерних експериментів були отримані результати, які дозволили виявити затримки і втрати пакетів, що виникають при передачі на всіх ділянках мережі при різних швидкостях передачі даних, а також були зроблені висновки по вибору швидкості передачі даних, близькою до оптимальної для даної архітектури мережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аль-Наггар Я. М. Алгоритм выбора головного узла кластера для всепроникающих сенсорных сетей с использованием нечеткой логики и диаграмм Вороного / Я. М. Аль-Наггар // Электросвязь. — 2014. — № 9. — С. 14–18.
2. Исследование централизованного управления архитектурной D2D-коммуникации на базе SDN / А. В. Амелянович, М. Н. Шпаков, А. С. А. Мутханна [та ін.] // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2017. — Т. 5. — № 2. — С. 13–24.
3. Андреев Д. В. Модельные сети для тестирования технических средств сетей связи следующего поколения. Рекомендация МСЭ-Т Q.3900 / Д. В. Андреев, Д. В. Тарасов, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2007. — № 12. — С. 12–15.
4. Беспилотный летательный аппарат [Электронный ресурс]. — Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_летательный_аппарат (11.11.2019).
5. Богданов И. А. Анализ особенностей обеспечения сетевой безопасности во всепроникающих сенсорных сетях / И. А. Богданов, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2013. — № 2. — С. 4–10.
6. Бондарев А. Н. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах / А. Н. Бондарев, Р. В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2016. — Т. 4. — № 4. — С. 13–23.
7. Самоорганизующиеся сети связи мультиагентных робототехнических систем / Е. Г. Борисов, А. Г. Владыко, А. И. Парамонов, Р. В. Киричек // Актуальные проблемы защиты и безопасности. XIX Всероссийская научно-практическая конференция: сборник научных статей. — 2016. — С. 210–217.
8. Бородин А. С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А. С. Бородин, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2017. — № 5. —

С. 47–51.

9. Варельджян К. С. Оптимизация траектории движения БПЛА в летающих сенсорных сетях / К. С. Варельджян, А. И. Парамонов, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2015. — № 7. — С. 20–25.

10. Динь З. Метод организации гетерогенного летающего шлюза для обслуживания устройств Интернета вещей с низким энергопотреблением / З. Динь, Р. В. Киричек // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. — СПб. : СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2017. — С. 204–205.

11. Иноземцев Д. П. Беспилотные летательные аппараты. Теория и практика / Д. П. Иноземцев // Технологии. Беспилотные летательные аппараты. — 2013. — № 2. — С. 48–51.

12. Киричек Р. В. Сети беспилотных летательных аппаратов как элемент инфраструктуры умных городов / Р. В. Киричек // 72-я Всероссийская научнотехническая конференция, посвященная Дню радио. — СПб. : СПбГЭУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2017. — С. 166–167.

13. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб. : Питер., 2011. — 944 с.

14. What will 5G be? / J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi [та ин.] // IEEE Journal on selected areas in communications. — 2014. — Vol. 32. — № 6. — P. 1065–1082.

15. Multilevel cloud based Tactile Internet system / A. A. Ateya, A. Vybornova, R. Kirichek, A. Koucheryavy // 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2017. — IEEE, 2017. — P. 105–110.

16. Bekmezci I. Flying Ad-Hoc Networks: A Survey / I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, S. Temel // Ad Hoc Networks, Elsevier. — 2013. — Vol. 11. — № 3. — P. 1254–1270.

17. Chornaya D. Investigation of Machine-to-Machine Traffic Generated By Mobile Terminals / D. Chornaya, A. Paramonov, A. Koucheryavy // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops

(ICUMT), 2014. — IEEE, 2014. — P. 210–213.

18. Ubiquitous Sensor Networks in the Heterogeneous LTE Network / A. Futahi, A. Koucheryavy, A. Paramonov, A. Prokopiev // 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2015. — IEEE, 2015. — P. 28–32.

19. The Quality of Experience Subjective Estimations and Hurst Parameters Values Interdependence. Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems / M. Makolkina, A. Paramonov, A. Prokopiev, A. Koucheryavy // Lecture Notes in Computer Science (LNCS). — 2014. — Vol. 8638. — P. 311–318.

20. Octave [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://www.gnu.org/software/octave/>.

21. Image Transmission over IEEE 802.15.4 and ZigBee Networks / G. Pekhteryev, Z. Sahinoglu, P. Orlik, G. Bhatti // 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. — 2005. — Vol. 4. — P. 3539–3542.

22. Tharini C. An Energy Efficient Spatial Correlation Base Data Gathering Algorithm for Wireless Sensor Networks / C. Tharini, V. Ranjan // International Journal of Distributed and Parallel Systems. — 2011. — Vol. 2. — № 3. — P. 16–24.

23. Vybornova A. Analysis of the Packet Path Lengths in the Swarms for Flying Ubiquitous sensor Networks / A. Vybornova, A. Paramonov, A. Koucheryavy // Communications in Computer and Information Science (CCIS). — 2017. — Vol. 678. — P. 362–370.

24. Recommendation ITU-R BT.500-13: Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures. — Geneva : ITU-R, January 2012. — 46 p.

25. Recommendation ITU-T K.81 High-power electromagnetic immunity guide for telecommunication systems. — ITU-T, 2016. — 12 p.

26. Recommendation ITU-T Y.1541. Network Performance objectives for IP-based services, Amendment 1. — 2011. — 8 p.

27. Recommendation ITU-T Y.4050/Y.2069 Terms and definitions for the Internet of things. — Recommendation ITU-T. — Jul 2012. — 14 p.