

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Грищенко  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

**Тема: «Розробка адаптивних бездротових мереж для управління  
безпілотними літальними апаратами»**

Виконавець: \_\_\_\_\_ АВ-409-Б, Д'яченко Пилип Вячеславович

\_\_\_\_\_ (студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: \_\_\_\_\_ старший викладач Смолич Денис Вікторович \_\_\_\_\_

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер:

\_\_\_\_\_ (підпис)

В.В. Левківський

(П.І.Б.)

Київ 2024

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ю.В.Грищенко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання дипломної роботи (проекту)

Д'яченко Пилип Вячеславович

1. Тема роботи: «Розробка адаптивних бездротових мереж для управління безпілотними літальними апаратами» затверджена наказом ректора від «14» 03 2024 р. № 385/ст
2. Термін виконання роботи: з 13 травня 2024 по 16 червня 2024.
3. Вихідні дані роботи: Дані про існуючі бездротові мережі для управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА), результати експериментів з моделювання радіоканалів, технічні специфікації обладнання для БПЛА, а також статистичні дані про надійність та продуктивність існуючих мереж. .
4. Зміст пояснювальної записки: Загальна інформація про бездротові мережі для управління БПЛА. Моделювання радіоканалів для БПЛА. Розробка та валідація адаптивних бездротових мереж для БПЛА. Аналіз продуктивності та компромісів у мережах БПЛА.
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: .

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Обґрунтування теми дипломної роботи	13.05.2024	
2.	Проведення огляду літератури	15.05.2024	
3.	Підготовка та написання 1 розділу	21.05.2024	
4.	Підготовка та написання 2 розділу	26.05.2024	
5.	Підготовка та написання 3 розділу	08.06.2024	
6.	Перевірка на анти плагіат та отримання рецензії на диплом	10.06.2024	
7.	Оформлення та друк пояснювальної записки	12.06.2024	
8.	Підготовка презентації та доповіді	15.06.2024	

7. Дата видачі завдання: 30 квітня 2024р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ Смолич Д.В.

(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Д'яченко П.В.

(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Розробка адаптивних бездротових мереж для управління безпілотними літальними апаратами»: 68 сторінок, рис., 8 літературних джерел.

**Об'єкт дослідження:** Дослідження бездротових мереж для управління БПЛА. Предметом дослідження є адаптивні алгоритми та моделі, що забезпечують надійну передачу даних у цих мережах.

**Предмет дослідження:** Предметом дослідження є адаптивні алгоритми та моделі бездротових мереж для управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА).

**Мета роботи:** Розробка адаптивних бездротових мереж для ефективного та надійного управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в різних умовах експлуатації.

**Методи дослідження:** Аналіз літературних джерел, математичне моделювання радіоканалів, комп'ютерне моделювання, а також емпіричні дослідження для валідації запропонованих моделей та алгоритмів.

# Зміст

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....</b>	<b>6</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>7</b>
<b>Розділ 1. МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВОГО КАНАЛУ ДЛЯ БПЛА.....</b>	<b>9</b>
1.1. Основні явища радіохвильового поширення .....	9
1.2. Моделювання радіохвильового поширення .....	10
1.3. Математичні моделі каналів .....	24
<b>Розділ 2. АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА КОМПРОМІСІВ У МЕРЕЖАХ БПЛА.....</b>	<b>31</b>
2.1. Огляд методологій оцінки продуктивності.....	31
2.2. Вивчення торговельних відносин між пропускною спроможністю, затримкою та надійністю .....	36
2.3. Стратегії оптимізації для забезпечення балансу між різними метриками продуктивності.....	40
<b>Розділ 3. СТРАТЕГІЇ РОЗГОРТАННЯ БПЛА ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ КОМУНІКАЦІЙ.....</b>	<b>46</b>
3.1. Теоретичні основи та аналітичні інструменти для оптимального розміщення БПЛА.....	46
3.2. Моделі розгортання для максимізації покриття та ефективності мережі ....	51
3.3. Проактивні стратегії розгортання з кешуванням для поліпшення продуктивності мережі .....	57
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>63</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>66</b>

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

- БПЛА** - Безпілотні літальні апарати
- LOS** - Лінія прямої видимості
- NLOS** - Відсутність лінії прямої видимості
- PRB** - Фізичний ресурсний блок
- QoS** - Якість обслуговування

## ВСТУП

**Актуальність теми:** швидкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відкриває нові можливості в різних сферах, таких як розвідка, спостереження, доставка вантажів, картографування та інше. Однак ефективне та надійне управління цими апаратами потребує розробки спеціалізованих бездротових мереж. Застосування адаптивних технологій у таких мережах дозволяє забезпечити стабільність та безпеку зв'язку, що є критично важливим у різних умовах експлуатації.

**Основні проблеми:** основною проблемою при розробці бездротових мереж для управління БПЛА є забезпечення надійної передачі даних у реальному часі, враховуючи можливі перешкоди, зміну топології мережі та високу мобільність апаратів. Це вимагає застосування сучасних методів моделювання радіоканалів, адаптивних алгоритмів управління ресурсами та інтеграції новітніх технологій зв'язку.

**Мета та завдання дослідження:** метою цієї дипломної роботи є розробка адаптивних бездротових мереж для управління безпілотними літальними апаратами, що забезпечать надійний зв'язок та ефективне управління у різних умовах експлуатації. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Аналіз сучасних методів моделювання радіоканалів для БПЛА.
- Розробка математичних моделей для оцінки якості зв'язку.
- Проведення емпіричних досліджень та комп'ютерного моделювання.
- Валідація запропонованих рішень на основі зібраних даних.

**Об'єкт та предмет дослідження:** об'єктом дослідження є бездротові мережі для управління БПЛА. Предметом дослідження є адаптивні алгоритми та моделі, що забезпечують надійну передачу даних у цих мережах.

**Методи дослідження:** у роботі використовуються системний аналітичний підхід, методи моделювання та статистичного аналізу, а також методи комп'ютерного моделювання та емпіричних досліджень. Ці методи дозволяють комплексно підходити до розробки та оцінки ефективності бездротових мереж для управління БПЛА.

**Наукова новизна та практичне значення:** розробка адаптивних бездротових мереж для управління БПЛА сприятиме підвищенню ефективності та безпеки їх використання, розширенню можливостей та сфер застосування. Запропоновані в роботі підходи та рішення можуть бути використані при проектуванні та впровадженні сучасних систем управління безпілотними апаратами, що забезпечить їх надійну роботу навіть у складних умовах.

Отже, тема дипломної роботи є актуальною та важливою з науково-технічної точки зору, оскільки вирішення поставлених завдань сприятиме розвитку сучасних технологій зв'язку та управління безпілотними літальними апаратами.



## Розділ 1. МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВОГО КАНАЛУ ДЛЯ БПЛА

### 1.1. Основні явища радіохвильового поширення

Відбиття – це зміна напрямку поширення радіохвилі при зустрічі з іншим середовищем. Коли радіохвиля вдаряється в іншу поверхню, частина енергії повертається назад в перше середовище. Кількість енергії, яка відбивається назад, залежить від властивостей матеріалу, кута падіння, частоти радіохвилі та її поляризації. Відбиття важливе для розуміння поширення сигналу в міських умовах, де радіохвилі часто зустрічаються з будівлями та іншими перешкодами .

Дифракція – це вигин радіохвилі навколо країв перешкоди, що дозволяє їй поширюватися за ці перешкоди. Це явище дозволяє радіохвилям долати кривизну Землі і поширюватися за горизонт. Дифракційна здатність залежить від розміру перешкоди щодо довжини хвилі. В загальному випадку, чим більша довжина хвилі, тим більше вона дифрагує при зустрічі з перешкодою. Наприклад, хвилі на частотах нижче 300 кГц можуть поширюватися за межі прямої видимості за рахунок дифракції .

Рефракція – це зміна напрямку поширення радіохвилі при переході з одного середовища в інше. Цікаве явище рефракції відбувається на частотах 0.3–30 МГц, коли радіохвилі можуть відбиватися від іоносфери і повертатися на Землю за горизонтом. Це дозволяє здійснювати далекі радіокомунікації. Рефракція відіграє важливу роль у поширенні радіохвиль на великі відстані, особливо для комунікаційних систем, які працюють на низьких частотах .

Розсіювання – це відбиття радіохвилі від нерівностей на поверхні перешкоди в різних напрямках. Це явище є слабшим у суб-6 ГГц бездротових каналах, але може бути значним на міліметрових хвилях, де дифракція стає

менш надійною. Розсіювання може призводити до поширення сигналу в різних напрямках, що впливає на якість прийому сигналу .

Поглинання – це втрата енергії радіохвилі при зустрічі з перешкодою. Ступінь поглинання залежить від властивостей перешкоди та довжини хвилі. Наприклад, проникнення хвиль через скляні матеріали зазвичай має низькі втрати, тоді як бетонні матеріали можуть значно поглинати радіохвилі. Низькочастотні радіохвилі можуть проникати через цегляні стіни, тоді як міліметрові хвилі можуть значно поглинатися водою та киснем .

Ці основні явища є фундаментальними для розуміння радіохвильового поширення в бездротових мережах, особливо в умовах міської забудови та інших складних середовищах.

## **1.2 Моделювання радіохвильового поширення**

Для розуміння радіохвильового поширення важливо моделювати взаємодію хвиль із середовищем. Це включає аналіз великих та малих масштабів ефектів поширення.

Великомасштабні ефекти поширення сигналу включають втрати сигналу в залежності від відстані поширення та затінення через перешкоди, такі як будівлі. Втрати сигналу зазвичай виражаються як сума залежних від відстані втрат та затінення. Це впливає на загальну потужність сигналу та його стабільність на великих відстанях.

Один із основних методів моделювання великомасштабних ефектів - це логарифмічні моделі втрат сигналу, такі як модель втрат сигналу вільного простору та двопроменева модель. Наприклад, у моделі втрат сигналу вільного простору втрати сигналу зростають експоненціально з відстанню. Ці моделі

використовуються для різних дизайнів бездротових систем, включаючи системи для БПЛА .

Маломасштабні ефекти поширення сигналу стосуються швидких коливань потужності сигналу через конструктивне та деструктивне комбінування багатьох шляхів сигналу на малому просторовому масштабі. Це явище відоме як зникання сигналу. Такі ефекти викликають швидкі зміни радіоканалу в часі, частоті та просторі.

Для аналізу таких змін використовуються статистичні моделі на основі емпіричних вимірювань. Наприклад, ефект Доплера, який виникає через рух приймача або передавача, викликає зміну частоти радіохвилі. Доплерівський зсув залежить від частоти хвилі та швидкості руху приймача .

Для моделювання радіохвильового поширення часто застосовуються методи трасування променів. Це підхід, що дозволяє прогнозувати поширення радіохвиль у заданому середовищі. Техніка трасування променів передбачає генерацію променів із джерела та аналіз їхнього поширення з урахуванням відбиття, дифракції, рефракції, розсіювання та поглинання.

Методи трасування променів мають високу точність і дозволяють оцінювати радіоканали в умовах, де вимірювання можуть бути недостатніми або важкодоступними. Однак, ці методи є обчислювально важкими і застосовуються лише для конкретних середовищ, для яких проводиться трасування .

Для опису статистики радіоканалу у часі, частоті та просторі використовуються математичні моделі. Наприклад, математична модель каналу може враховувати зміни частоти через ефект Доплера, затримки сигналу, а також ефекти відбиття та розсіювання. Важливою складовою є врахування багатопроменевих шляхів, які можуть мати різні рівні затухання, доплерівські зсуви та затримки.

Ці моделі допомагають прогнозувати поведінку радіоканалів та оптимізувати бездротові системи, зокрема для БПЛА, забезпечуючи ефективну передачу даних навіть у складних умовах поширення сигналу .

Ці підходи дозволяють детально аналізувати радіохвильове поширення, враховуючи всі ключові фактори, які впливають на якість та стабільність бездротових комунікацій.

Великомасштабні ефекти поширення сигналу охоплюють втрати сигналу в залежності від відстані поширення та затінення через великі перешкоди, такі як будівлі. Ці ефекти зазвичай моделюються з використанням моделей втрат сигналу та моделей затінення.

Втрати сигналу у вільному просторі є початковою точкою для характеристики втрат сигналу. Ця модель підходить для каналів з прямою видимістю (LOS), особливо на великих висотах, де відсутні відбиття від поверхні Землі. Втрати сигналу у вільному просторі залежать від відстані між передавачем та приймачем та частоти сигналу. Втрати сигналу можуть бути описані рівнянням Фріса, яке включає відстань, частоту та антени передавача і приймача.

Затінення виникає через перешкоди на шляху сигналу, такі як будівлі. Це призводить до додаткових втрат сигналу. Модель затінення може бути виражена як додатковий множник до втрат сигналу у вільному просторі. Найчастіше використовується логнормальна модель затінення, яка враховує статистичні характеристики затінення в різних середовищах.

Атмосферні умови, такі як вологість, тиск та температура, можуть впливати на поширення електромагнітних хвиль. Вплив погоди, зокрема дощових опадів, стає значним на міліметрових хвилях, де краплі дощу можуть значно поглинати сигнал. Такі ефекти повинні враховуватися при проектуванні систем комунікацій для БПЛА.

Маломасштабні ефекти поширення сигналу пов'язані з швидкими коливаннями потужності сигналу через конструктивне та деструктивне комбінування багатьох шляхів сигналу на малому просторовому масштабі. Ці ефекти зазвичай називають згасанням сигналу.

Згасання сигналу виникає через те, що приймач отримує радіохвилі, які прийшли різними шляхами з різними затримками та фазовими зсувами. Це призводить до швидких змін амплітуди прийнятого сигналу через ефект Доплера, який залежить від швидкості руху передавача або приймача. Згасання сигналу може бути охарактеризовано різними моделями, такими як Релеївська або Райсовська моделі затухання.

Часова селективність описує, як канал змінюється з часом. Доплерівське розсіювання виникає через рух об'єктів, що викликає зміни частоти радіохвилі. Доплерівський спектр може бути обчислений шляхом застосування перетворення Фур'є до автокореляційної функції каналу, що дозволяє визначити розсіювання Доплера та, відповідно, його вплив на сигнал .

Просторова селективність описує зміну каналу в просторі. Кутове розсіювання виникає через відбиття від поверхонь під різними кутами, що впливає на розподіл потужності сигналу у просторі. Ці ефекти важливі для систем з кількома антенами, де сигнали можуть проходити різні середовища та згасати по-різному. Для моделювання цих ефектів використовуються різні статистичні моделі, які враховують характеристики мультипутів та кутів приходу сигналу .

Ці великомасштабні та маломасштабні ефекти є ключовими для розуміння поведінки радіоканалів і проектування ефективних бездротових систем, включаючи системи управління безпілотними літальними апаратами.

Втрати сигналу у вільному просторі є основною моделлю для характеристики втрат сигналу в умовах прямої видимості (LOS). Ця модель є особливо корисною для повітряних бездротових каналів, де висока ймовірність

прямого LOS поширення. На великих висотах, де немає відбиттів від землі, поширення електромагнітних хвиль у повітря-повітря (AA) каналах наближається до поширення у вільному просторі. Для каналу повітря-земля (AG) з передавачем або приймачем на великій висоті, поширення у вільному просторі є точним наближенням для характеристики втрат сигналу у присутності LOS, як це підтверджено багатьма вимірювальними кампаніями.

Модель, яка описує втрати сигналу у вільному просторі, була розроблена Гарольдом Т. Фрісом. Припустимо, що  $u(t)$  – це комплексний базовий сигнал на передавачі. Відповідний пасивний сигнал можна записати як  $s(t) = Re(u(t)e^{j2\pi f_c t})$  де  $f_c$  – несуча частота, а початкова фаза для простоти вважається рівною нулю. Для приймача, розташованого на відстані  $d$  від передавача, сигнал масштабується на коефіцієнт  $\frac{\lambda\sqrt{G_t G_r}}{4\pi d}$  і має затримку поширення  $\frac{d}{c}$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі носія,  $G_t$  і  $G_r$  – діаграми спрямованості антен передавача та приймача у напрямку LOS відповідно, а  $c$  – швидкість світла.

Отриманий сигнал можна записати як:

$$r(t) = Re\left(\frac{\lambda\sqrt{G_t G_r}}{4\pi d} u\left(t - \frac{d}{c}\right) e^{j2\pi f_c\left(t - \frac{d}{c}\right)}\right)$$

Отримана потужність  $P_r$  у Ваттах дорівнює:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2,$$

де  $P_t$  – потужність передавача. Це означає, що втрати сигналу у вільному просторі пропорційні квадрату відстані між антенами передавача і приймача та обернено пропорційні квадрату довжини хвилі сигналу. Наприклад, при порівнянні втрат сигналу у вільному просторі на частотах 1 ГГц та 60 ГГц, остання частота зазнає більше ніж на 35 дБ більших втрат сигналу.

Втрати сигналу у вільному просторі можна інтуїтивно зрозуміти наступним чином. Ефективна ізотропно випромінювана потужність (EIRP) – це

добуток потужності передавача і коефіцієнта підсилення антени передавача, тобто  $P_t G_t$ . Щільність потоку потужності на приймачі дорівнює EIRP, поділеному на площу поверхні сфери радіусом  $d$ , тобто  $\frac{P_t G_t}{4\pi d^2}$ . Отримана потужність  $P_r$  визначається як добуток щільності потоку потужності та ефективною площі антени, що захоплює корисну енергію. Коефіцієнт підсилення антени приймача може бути виражений через ефективну площу антени та довжину хвилі носія:

$$G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

де  $A_e$  – ефективна площа антени приймача. Множення щільності потоку потужності  $\frac{P_t G_t}{4\pi d^2}$  на ефективну площу антени  $A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$  дає вираз для отриманої потужності  $P_r$  у вільному просторі.

Втрати сигналу у вільному просторі пропорційні квадрату відстані між антенами передавача та приймача. Це означає, що з ростом відстані отримана потужність зменшується. Крім того, втрати сигналу у вільному просторі обернено пропорційні квадрату довжини хвилі сигналу. Наприклад, порівнюючи втрати сигналу у вільному просторі на частоті 1 ГГц і на частоті 60 ГГц, друга частота зазнає більших втрат сигналу на понад 35 дБ.

Високі частоти, такі як міліметрові хвилі (наприклад, 60 ГГц), зазнають значних втрат сигналу у вільному просторі. Однак, малі розміри антен на таких частотах дозволяють використовувати більш направлені антени з високим коефіцієнтом підсилення, що допомагає компенсувати великі втрати сигналу. Наприклад, адаптивні антени можуть бути використані для комунікацій БПЛА на міліметрових хвилях, формуючи вузькі промені з високим підсиленням, що зменшує втрати сигналу. Однак, використання адаптивних антен може збільшити обчислювальне навантаження на БПЛА.

Таким чином, втрати сигналу у вільному просторі є критично важливим аспектом для розуміння поширення радіохвиль та проектування бездротових систем зв'язку, зокрема для безпілотних літальних апаратів.

Затінення є важливим фактором, який впливає на поширення радіосигналу, особливо в міських умовах. Воно виникає через блокування сигналу великими об'єктами, такими як будівлі, дерева або інші структури. Ці перешкоди викликають додаткові втрати потужності сигналу, які змінюються в залежності від розміру, розташування та діелектричних властивостей цих об'єктів, а також від змін у поверхнях відбиття і розсіювання.

На відміну від детермінованих моделей втрат, які розглядають лише середні втрати сигналу на певній відстані, затінення викликає випадкові варіації навколо цих середніх значень. Ці випадкові варіації відомі як повільне згасання або затінення. Для моделювання цих варіацій використовуються статистичні моделі. Було показано, що випадкові втрати сигналу через затінення можуть бути описані логнормальним розподілом, що підтверджено багатьма вимірами у внутрішніх і зовнішніх середовищах .

У моделі логнормального затінення випадкові втрати сигналу описуються випадковою змінною  $X_{dB}$  , яка має логнормальний розподіл:

$$f_{X_{dB}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x_{dB}}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{x_{dB}})^2}{2\sigma_{x_{dB}}^2}\right),$$

де  $f_{X_{dB}}(x)$  - функція густини ймовірності для  $X_{dB}$  ,  $\mu_{x_{dB}}$  - середнє значення, а  $\sigma_{x_{dB}}$  - стандартне відхилення цієї змінної. Середнє затінення може бути включене в детерміновану модель втрат, в такому випадку  $\mu_{x_{dB}}=0$  у логнормальній моделі затінення .

Важливо враховувати просторову автокореляцію затінення, оскільки блокувальні об'єкти для різних каналів зв'язку, розташованих у близькості, можуть бути сильно корельованими. Просторова автокореляція затінення часто



моделюється процесом першого порядку авторегресії. У цій моделі для двох точок, розділених відстанню  $\delta$ , просторова автокореляція затінення  $R(\delta)$  визначається як:

$$R(\delta) = E[(X_{dB}(d) - \mu_{X_{dB}})(X_{dB}(d + \delta) - \mu_{X_{dB}})] = \sigma_{x_{dB}}^2 \exp(-\delta/d_c),$$

де  $d_c$  - відстань декореляції, яка визначає відстань, на якій автокореляція дорівнює  $\sigma_{x_{dB}}^2/e$ .

Одним з особливих видів затінення в авіаційних каналах зв'язку є затінення корпусом літального апарату. Це відбувається, коли тіло літального апарату блокує пряму лінію видимості (LOS) між передавачем і приймачем, особливо під час маневрів. Характеристики затінення корпусу залежать від структури, матеріалу та характеристик польоту літального апарату.

Вимірювання показали, що затінення корпусом може призводити до втрат сигналу до 28 дБ у діапазоні 5.7 ГГц під час поворотів .

Таким чином, затінення є важливим фактором, який необхідно враховувати при проектуванні бездротових систем зв'язку, зокрема для безпілотних літальних апаратів, для забезпечення надійного зв'язку у різних умовах.

Атмосферні умови, такі як вологість, тиск та температура, можуть значно впливати на поширення електромагнітних хвиль. Газові молекули, такі як кисень і водяна пара, можуть спричиняти загасання сигналу. Це загасання моделюється додатковими коефіцієнтами втрат, які додаються до загальних втрат сигналу в децибелах. Як зазначено в літературі, загасання може змінюватися залежно від висоти БПЛА, оскільки змінюються умови вологості, тиску та температури в атмосфері.

Газові молекули, такі як кисень і водяна пара, можуть поглинати електромагнітні хвилі, викликаючи загасання сигналу. Втрати сигналу через ці молекули залежать від їх концентрації в атмосфері, яка змінюється в залежності

від висоти, температури та тиску. Високі концентрації водяної пари та кисню можуть призводити до значних втрат сигналу, особливо на високих частотах. Як правило, ці втрати є вищими на нижчих висотах, де концентрація газових молекул є більшою.

Випарні шари утворюються через швидке зменшення тиску водяної пари від поверхні моря до певної висоти, що призводить до покращеного поширення радіохвиль. Це явище часто спостерігається над морськими поверхнями, де висока вологість і температура сприяють утворенню випарних шарів. Ці шари можуть зменшувати втрати сигналу і навіть посилювати його поширення на великі відстані, створюючи ефект природного хвилеводу для електромагнітних хвиль.

Дощові опади значно впливають на загасання сигналу, особливо на міліметрових хвилях. Краплі дощу можуть поглинати і розсіювати радіохвилі, що призводить до значних втрат сигналу. Втрати сигналу через дощ залежать від інтенсивності опадів, форми та розміру крапель дощу. Згідно з моделлю, рекомендованою Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU), специфічне загасання  $\gamma_{rain}$  (дБ/км) є функцією швидкості опадів  $R$  (мм/год) і визначається степеневим законом:

$$\gamma_{rain} = k(f)R^{\alpha(f)},$$

де  $k(f)$  – мультиплікативний коефіцієнт,  $\alpha(f)$  – степеневий показник, і обидва залежать від частоти  $f$ .

Вплив погодних умов є більш значущим на міліметрових хвилях порівняно з частотами нижче 6 ГГц. Це пояснюється тим, що електричний розмір крапель дощу в міліметровому діапазоні є більшим, що призводить до значного розсіювання та поглинання радіохвиль. Зі збільшенням дистанції зв'язку втрати сигналу через погодні умови можуть стати драматичними, особливо на міліметрових хвилях. Тому при проектуванні систем зв'язку для БПЛА, які

використовують міліметрові хвилі, необхідно враховувати вплив погоди, особливо ефект загасання через дощ.

Атмосферні та погодні ефекти є важливими факторами, які слід враховувати при проектуванні та моделюванні бездротових систем зв'язку, особливо для безпілотних літальних апаратів, де зміни в атмосферних умовах можуть суттєво впливати на якість зв'язку.

Згасання сигналу, або фейдинг, виникає через накладання сигналів, які приходять різними шляхами з різними затримками та фазовими зсувами. Це явище є результатом багатопроменевого поширення сигналів, коли приймач отримує радіохвилі з різних напрямків і з різними затримками. Ці радіохвилі можуть мати випадкові амплітуди, фази та кути приходу, що призводить до швидких змін амплітуди прийнятого сигналу.

Для опису згасання сигналу використовуються різні моделі, залежно від умов поширення. Однією з основних моделей є Релеївська модель, яка застосовується в умовах, коли немає прямої видимості (NLOS). В цій моделі вважається, що сигнал, який досягає приймача, є сумою великої кількості відбитих і розсіяних шляхів з незалежними амплітудами та фазами. Амплітуда сигналу в такому випадку має Релеївський розподіл:

$$f_{|h|}(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

де  $\sigma$  – це параметр масштабу, що визначає середню потужність сигналу. У випадку прямої видимості (LOS) застосовується Райсовська модель, яка враховує наявність стаціонарної компоненти сигналу разом з випадковими відбитими та розсіяними шляхами. Амплітуда сигналу в Райсовській моделі описується Райсовським розподілом:

$$f_{|h|}(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ax}{\sigma^2}\right)$$

де  $A$  – це амплітуда стаціонарної компоненти сигналу, а  $I_0$  – це модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку. Параметр  $K$  визначає співвідношення між потужністю стаціонарної компоненти та потужністю випадкових компонентів і називається фактором Райса.

Доплерівське розсіювання виникає через рух передавача, приймача або об'єктів у середовищі поширення, що змінює частоту радіохвиль. Доплерівське зміщення призводить до зміни частоти сигналу, що сприймається приймачем, залежно від швидкості та напрямку руху. Для оцінки впливу Доплерівського розсіювання на сигнал використовується доплерівський спектр, який характеризує розподіл потужності сигналу за частотами. Доплерівський спектр можна отримати, застосувавши перетворення Фур'є до автокореляційної функції каналу:

$$S_h(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} R_h(\Delta t) e^{-j2\pi\Delta t} d(\Delta t),$$

де  $R_h(\Delta t)$  – це автокореляційна функція каналу, а  $\mu$  – це доплерівська частота. Кореляційний час і доплерівське розсіювання є взаємно оберненими: менше доплерівське розсіювання відповідає більшому кореляційному часу і навпаки.

Часткова селективність каналу описує зміну каналу у часовій доменній області, тоді як просторово-часова селективність включає зміни каналу у просторі та часі. Ці явища важливі для систем з багатьма антенами, де сигнали, що приймаються різними антенами, можуть проходити через різні середовища та згасати по-різному. Для аналізу цих ефектів використовується концепція когерентного часу, який визначає інтервал часу, протягом якого канал залишається корельованим:

$$R_h(\Delta t) = E[h(t)h(t + \Delta t)]$$

Де  $R_h(\Delta t)$  – автокореляційна функція каналу, яка описує взаємозв'язок сигналів у різні моменти часу.

Таким чином, згасання сигналу є складним явищем, яке залежить від багатьох факторів, включаючи рух передавача та приймача, наявність відбиттів та розсіювань, а також від характеристик середовища поширення. Розуміння цих ефектів є ключовим для проектування надійних бездротових систем зв'язку, особливо для безпілотних літальних апаратів.

Часова селективність каналу описує зміну каналу у часі. Вона визначається тим, як швидко змінюється характеристика каналу протягом часу. Одним із показників часової селективності є когерентний час ( $T_c$ ), який визначається як інтервал часу, протягом якого канал залишається корельованим. Функція автокореляції каналу  $R_h(\Delta t)$  описує взаємозв'язок сигналів у різні моменти часу:

$$R_h(\Delta t) = E[h(t)h(t + \Delta t)]$$

де  $h(t)$  - це характеристика каналу у часі. Когерентний час визначається як часова різниця, при якій автокореляція каналу зменшується до половини свого початкового значення:

$$R_h(T_c) = 0.5R_h(0).$$

Чим більший когерентний час, тим менша часова селективність каналу. Якщо когерентний час значно менший за тривалість передачі блоку даних, канал називають швидко змінним (fast fading). Якщо когерентний час значно довший за тривалість передачі блоку даних, канал називають повільно змінним (slow fading) .

Доплерівське розсіювання виникає через рух передавача, приймача або об'єктів у середовищі поширення, що змінює частоту радіохвиль. Різні мультипути можуть мати різні зміщення частоти через доплерівські ефекти, які можуть конструктивно або деструктивно накладатися один на одного, змінюючи амплітуду прийнятого композитного сигналу.

Спектр Доплера  $S_h(\mu)$  можна отримати, застосувавши перетворення Фур'є до функції автокореляції каналу:

$$S_h(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} R_h(\Delta t) e^{-j2\pi\mu\Delta t} d(\Delta t),$$

де  $\mu$  - це доплерівська частота. Ширина спектру Доплера ( $D_s$ ) визначається як середньоквадратичне відхилення доплерівського спектру і може бути розрахована як:

$$D_s = \sqrt{E[\mu^2] - (E[\mu])^2},$$

де  $E[\mu^n]$  - n-й момент доплерівського спектру  $S_h(\mu)$ . Відношення між когерентним часом та доплерівським розсіюванням є оберненим: чим менше доплерівське розсіювання, тим більший когерентний час .

Для повітряних каналів існують три основні компоненти: компонент прямої видимості (LOS), відбиття від землі та дифузне розсіювання. Компонент прямої видимості зазнає зсуву частоти через відносний рух передавача та приймача, тоді як відбиття від землі та розсіювання значно впливають на ширину спектру Доплера. Наприклад, коли два БПЛА летять один за одним на однаковій висоті і з однаковою швидкістю, спектр Доплера стає ширшим зі збільшенням затримки. Для затримки, що відповідає відбиттю від землі, спектр Доплера має форму "W", а для затримки, що відповідає променям, що відбиваються, спектр Доплера набуває форми спектру Джейкса .

Таким чином, часова селективність та доплерівське розсіювання є важливими аспектами, які необхідно враховувати при проектуванні бездротових систем зв'язку, особливо для безпілотних літальних апаратів, де рух передавача та приймача може суттєво впливати на якість зв'язку.

Просторова селективність каналу описує зміну характеристик каналу у просторі. Це явище є особливо важливим для систем з багатьма антенами, де сигнали, що приймаються різними антенами, можуть проходити через різні

середовища та згасати по-різному. Один із показників просторової селективності є когерентна відстань ( $D_c$ ), яка визначає максимальну відстань між антенами, при якій прийняті сигнали залишаються корельованими.

Функція автокореляції каналу  $R_h(\Delta_r)$  описує взаємозв'язок сигналів у різних просторових точках:

$$R_h(\Delta_r) = E[h(r)h^*(r + \Delta_r)],$$

де  $\Delta_r$  - це різниця у відстані. Когерентна відстань визначається як найбільша зміна позиції, при якій  $R_h(\Delta_r) \leq 0.5R_h(0)$  для всіх  $\Delta_r \leq D_c$ . Чим більша когерентна відстань, тим менша просторова селективність каналу.

Кутове розсіювання виникає через відбиття сигналу під різними кутами. Це явище описує розподіл потужності сигналу за кутами приходу (AoA). Кутове розсіювання є важливим для розуміння просторових характеристик каналу, особливо у багатопроменевих середовищах, де сигнали можуть відбиватися та розсіюватися під різними кутами.

Для аналізу кутового розсіювання використовується спектр хвильового числа ( $S_h(\Delta k)$ ), який визначає розподіл потужності сигналу у кутовому домені. Перетворення Фур'є функції автокореляції просторового каналу дає спектр хвильового числа:

$$S_h(\Delta k) = \int_{-\infty}^{\infty} R_h(\Delta r) e^{-j2\pi k \Delta r} d(\Delta r),$$

де  $k$  - це хвильове число. Кореляційна відстань і спектр хвильового числа є обернено пропорційними: чим менший спектр хвильового числа, тим більша когерентна відстань.

Для аналізу кутового розсіювання часто використовується кутовий спектр потужності ( $S_h(\varphi, \theta)$ ), який описує розподіл потужності прийнятих сигналів за азимутальним та зенітним кутами приходу. Однією з популярних моделей для опису кутового спектру є усічений розподіл Лапласа:

$$S_h(\phi) = \frac{1}{\left(1 - e^{-\sqrt{2\pi}/\sigma}\right) \sqrt{2\phi/\sigma}} e^{-\left|\sqrt{2\phi}/\sigma\right|}, \phi \in [-\pi, \pi),$$

де  $\sigma$  - це параметр масштабу.

Дослідження показали, що кутова розбіжність сигналу є важливою характеристикою для опису просторових характеристик каналу. Менша кутова розбіжність вказує на більшу просторову кореляцію сигналів, що приймаються різними антенами.

Таким чином, просторова селективність та кутове розсіювання є критично важливими аспектами для проектування та оптимізації бездротових систем зв'язку, особливо для безпілотних літальних апаратів, де сигнали можуть відбиватися та розсіюватися під різними кутами, що впливає на якість зв'язку.

### 1.3. Математичні моделі каналів

Математичні моделі каналів використовуються для опису статистичних характеристик радіоканалів у часових, частотних та просторових доменах. Основним завданням є моделювання змін каналу під впливом різних фізичних явищ, таких як відбиття, дифракція, рефракція та розсіювання. Основні рівняння для опису поведінки радіохвиль є рівняння Максвелла, які враховують характеристики фізичних об'єктів у середовищі.

Рівняння Максвелла є фундаментальними для опису поведінки електромагнітних полів у середовищі. Вони описують взаємозв'язок між електричними та магнітними полями і можуть бути використані для аналізу поширення електромагнітних хвиль у різних умовах. Застосування цих рівнянь



дозволяє врахувати вплив фізичних об'єктів, таких як будівлі, дерева або інші перешкоди, на поширення радіохвиль .

Методи трасування променів використовуються для моделювання траєкторій радіохвиль, що відбиваються, дифрагують та розсіюються у середовищі поширення. Ці методи генерують промені з джерела, які проходять через різні середовища, відбиваються від поверхонь і зазнають різних видів загасання. Цей підхід дозволяє детально змодельовати процес поширення сигналів у складних середовищах, таких як міські умови або середовища з великою кількістю перешкод .

Статистичні моделі використовуються для опису поведінки сигналів у середовищах з множинними шляхами, таких як моделі Релея та Райса. Ці моделі враховують випадковий характер поширення сигналів, викликаний багатопроменевими ефектами. Релеївська модель застосовується у випадках, коли немає прямої видимості (NLOS), а Райсовська модель - коли є пряма видимість (LOS) між передавачем та приймачем.

- **Релеївська модель:** Описує згасання сигналу в умовах, коли немає прямої видимості між передавачем та приймачем. Вважається, що сигнал, який досягає приймача, є сумою великої кількості відбитих і розсіяних шляхів з незалежними амплітудами та фазами .
- **Райсовська модель:** Враховує наявність стаціонарної компоненти сигналу разом з випадковими відбитими та розсіяними шляхами. Використовується у випадках, коли є пряма видимість між передавачем та приймачем .

Моделювання багатопроменевих сигналів включає врахування різних шляхів, якими сигнал досягає приймача. Це враховує відбиття, дифракцію, рефракцію та розсіювання радіохвиль. Важливим аспектом є врахування доплерівських зсувів, які виникають через рух передавача або приймача, що призводить до змін частоти сигналу .

Моделі затримки описують час, який потрібен сигналу для досягнення приймача через різні шляхи. Моделі розсіювання враховують зміни амплітуди та фази сигналу через накладання різних шляхів. Для аналізу використовуються автокореляційні функції та спектри розсіювання, які дозволяють оцінити характеристики каналу в різних умовах .

Математичні моделі каналів використовуються для проектування та оптимізації систем зв'язку, зокрема для безпілотних літальних апаратів. Вони дозволяють враховувати вплив різних фізичних факторів на якість зв'язку і забезпечують можливість прогнозування характеристик радіоканалів у реальних умовах.

- ❖ **Польові випробування:** Використовуються для збору даних про якість зв'язку в реальних умовах і порівняння їх з результатами моделювання для оцінки точності моделей .
- ❖ **Комп'ютерне моделювання:** Дозволяє проводити детальний аналіз різних сценаріїв поширення сигналів і оцінювати якість зв'язку у складних умовах, таких як міські або сільські території .

Ці підходи допомагають структурувати процес розробки та валідації моделей для оцінки якості зв'язку, забезпечуючи надійне та ефективне функціонування бездротових систем зв'язку.

Емпіричні методи валідації використовуються для підтвердження точності математичних моделей каналів зв'язку, застосовуваних для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці методи базуються на реальних вимірюваннях та експериментах, що дозволяють перевірити, наскільки добре математичні моделі відповідають реальним умовам. Основні підходи включають польові випробування, аналіз зібраних даних та калібрування моделей.

Польові випробування є критичним етапом валідації моделей, оскільки вони дозволяють отримати реальні дані про якість зв'язку у різних умовах.

Вимірювання проводяться на місцевості з використанням БПЛА для збору даних про потужність сигналу, затримки, втрати сигналу та інші параметри.

- **Організація випробувань:** Випробування проводяться у різних умовах, включаючи міські та сільські території, на різних висотах та з різними швидкостями руху БПЛА.
- **Збір даних:** Використовуються спеціальні вимірювальні пристрої для збору даних про характеристики каналу зв'язку. Зібрані дані включають інформацію про потужність сигналу, затримки, рівень шуму та інші параметри, які впливають на якість зв'язку.

Після збору даних проводиться їх аналіз для порівняння з результатами, отриманими за допомогою математичних моделей. Це дозволяє оцінити точність моделей та виявити можливі розбіжності між моделями та реальними умовами.

- ✓ **Обробка даних:** Зібрані дані обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу параметрів каналу. Це дозволяє отримати детальну інформацію про поведінку сигналу у різних умовах.
- ✓ **Порівняння з моделями:** Результати вимірювань порівнюються з прогнозами математичних моделей. Це дозволяє визначити, наскільки добре моделі відповідають реальним даним та виявити можливі неточності.

Калібрування моделей здійснюється на основі аналізу зібраних даних. Це дозволяє налаштувати параметри моделей для підвищення їх точності та адаптації до специфічних умов середовища, у якому використовуються БПЛА.

- **Налаштування параметрів:** На основі зібраних даних параметри моделей налаштовуються для досягнення максимальної відповідності реальним умовам. Це може включати коригування параметрів затримок, втрат сигналу та інших характеристик каналу.
- **Валідація налаштованих моделей:** Після калібрування моделі знову перевіряються за допомогою нових вимірювань для підтвердження їх точності. Це дозволяє переконатися, що налаштовані моделі адекватно

відображають реальні умови та забезпечують точні прогнози характеристик зв'язку.

Емпіричні методи валідації є важливими для забезпечення надійності та точності математичних моделей каналів зв'язку, що використовуються для проектування та оптимізації безпілотних літальних апаратів. Вони дозволяють забезпечити високу якість зв'язку у різних умовах експлуатації БПЛА.

Комп'ютерне моделювання є важливим інструментом для аналізу та оцінки ефективності бездротових систем зв'язку, особливо у випадках, коли експериментальні дослідження складно або неможливо здійснити. Моделювання дозволяє створювати віртуальні середовища, які відображають реальні умови експлуатації, що дає можливість тестувати різні сценарії та налаштування системи без потреби у проведенні дорогих і тривалих польових випробувань.

Симуляційні програми використовуються для створення віртуальних моделей радіоканалів та аналізу поширення сигналів. Це дозволяє проводити детальний аналіз різних сценаріїв поширення сигналів, враховуючи особливості середовища та характеристики обладнання. Такі програми, як MATLAB, NS-3, OPNET, широко застосовуються для моделювання бездротових систем зв'язку.

- **MATLAB:** Платформа, яка надає інструменти для числового аналізу, візуалізації даних та моделювання. MATLAB дозволяє моделювати поведінку радіоканалів, аналізувати їх характеристики та проводити валідацію моделей.
- **NS-3:** Інструмент для моделювання мережевих протоколів та систем зв'язку. NS-3 використовується для симуляції роботи бездротових мереж, включаючи сценарії з використанням БПЛА.
- **OPNET:** Платформа для моделювання та аналізу продуктивності мереж. OPNET дозволяє моделювати складні мережеві топології та аналізувати вплив різних факторів на якість зв'язку.

Моделювання сценаріїв включає створення віртуальних моделей різних середовищ та ситуацій для оцінки ефективності зв'язку у різних умовах. Це може включати моделювання міських та сільських територій, різних погодних умов, а також різних висот польоту БПЛА.

- **Міські середовища:** Моделювання міських середовищ дозволяє оцінити вплив будівель та інших конструкцій на поширення сигналів. Важливо враховувати відбиття, дифракцію та затінення, які виникають у таких середовищах.
- **Сільські середовища:** У сільських середовищах поширення сигналів може бути менш складним, але важливо враховувати вплив рельєфу та рослинності.
- **Висота польоту:** Моделювання на різних висотах польоту дозволяє оцінити вплив висоти на поширення сигналів та виявити оптимальні висоти для забезпечення стабільного зв'язку.

Аналіз результатів моделювання дозволяє інтерпретувати отримані дані та використовувати їх для покращення реальних систем зв'язку. Це включає виявлення оптимальних параметрів для налаштування систем зв'язку, прогнозування характеристик радіоканалів у реальних умовах та оцінку ефективності запропонованих рішень.

- **Валідація моделей:** Результати моделювання порівнюються з експериментальними даними для підтвердження точності моделей. Це дозволяє забезпечити відповідність моделей реальним умовам експлуатації.
- **Оптимізація систем:** На основі аналізу результатів моделювання здійснюється оптимізація систем зв'язку, включаючи налаштування параметрів обладнання та вибір оптимальних топологій мережі.
- **Прогнозування продуктивності:** Моделювання дозволяє прогнозувати продуктивність систем зв'язку у різних умовах, що допомагає виявити потенційні проблеми та розробити заходи для їх усунення.

Комп'ютерне моделювання є незамінним інструментом для розробки та оптимізації бездротових систем зв'язку, забезпечуючи можливість детального аналізу різних сценаріїв та забезпечення високої якості зв'язку у різних умовах експлуатації.

## Розділ 2. АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА КОМПРОМІСІВ У МЕРЕЖАХ БПЛА

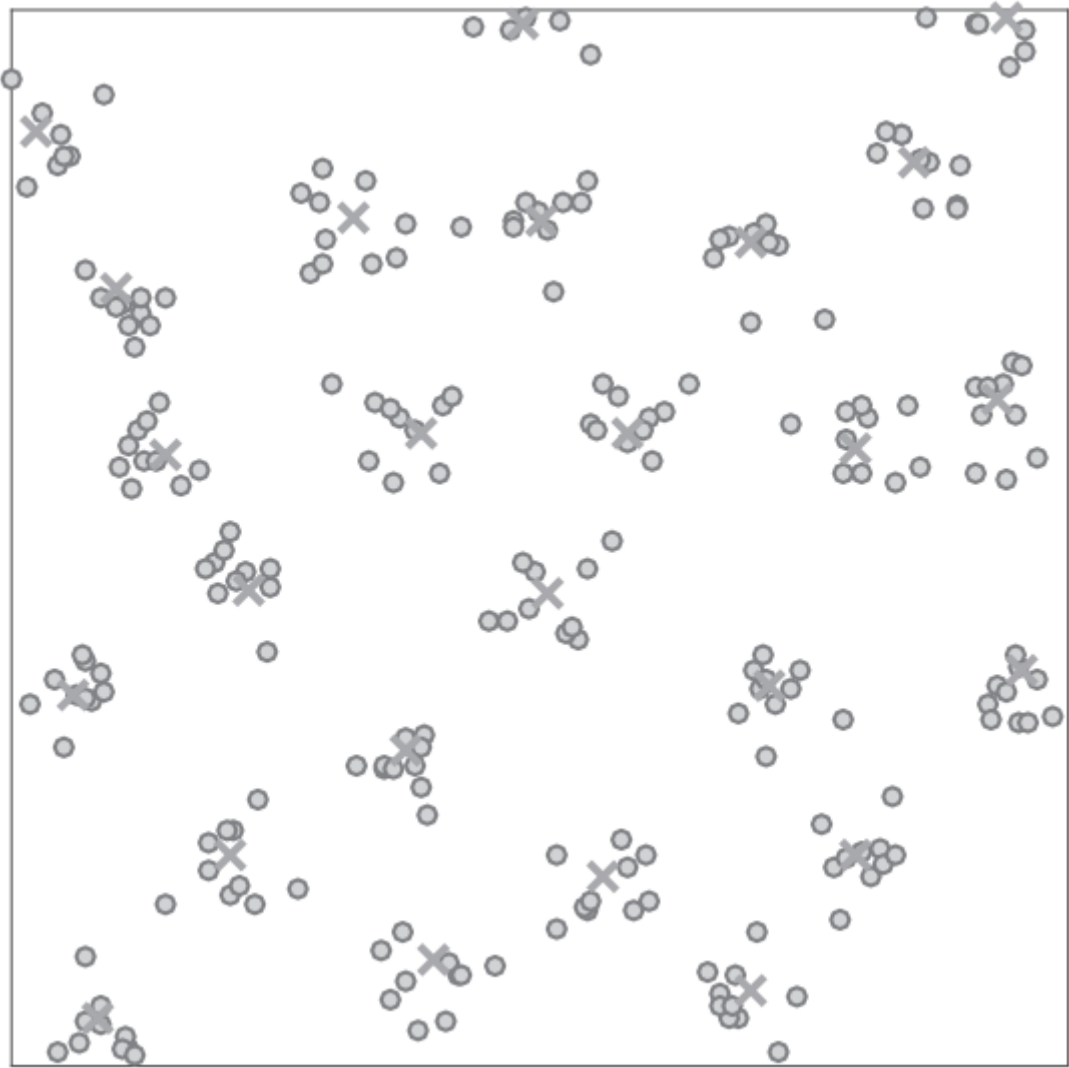
### 2.1 Огляд методологій оцінки продуктивності

Стохастична геометрія є важливим інструментом для аналізу продуктивності бездротових мереж, особливо в умовах, коли мережеві вузли розташовані випадковим чином. Цей підхід використовується для оцінки таких ключових показників продуктивності, як ймовірність покриття, швидкість передачі даних та пропускна спроможність.

Стохастична геометрія дозволяє моделювати просторові конфігурації бездротових мереж за допомогою випадкових точкових процесів. Один з найбільш поширених процесів - це пуассонівський точковий процес (PPP). PPP використовується для моделювання випадкових розташувань користувачів або базових станцій у мережі. На рисунку 4.1 наведено приклад 2D пуассонівського точкового процесу для моделювання розташувань користувачів.

Стохастична геометрія забезпечує математичні інструменти для аналізу продуктивності мереж з випадковими розташуваннями вузлів. Основна ідея полягає в тому, щоб розглядати розташування вузлів мережі як набір випадкових точок, розподілених у просторі, а потім аналізувати статистичні характеристики цих точок. Цей підхід дозволяє отримувати важливі метрики продуктивності, такі як ймовірність покриття, швидкість передачі даних та пропускна спроможність.

Для моделювання розташувань вузлів мережі можуть використовуватися різні типи стохастичних процесів. Наприклад, для моделювання розташувань дронів у гарячих точках (hotspots) можна використовувати пуассонівські або біноміальні кластерні процеси.



**Рис 1. Приклад 2D пуассонівського кластерного процесу для моделювання розташувань користувачів**

На рисунку наведено приклад 2D пуассонівського кластерного процесу для моделювання розташувань користувачів.

Кластерні процеси дозволяють моделювати групування вузлів, що підвищує точність оцінки продуктивності мережі. Для забезпечення мінімальної відстані між дронами можна використовувати процеси з жорстким ядром, такі як процес Matern. Це допомагає уникнути зіткнень і зменшити інтерференцію між дронами.

Стохастична геометрія дозволяє аналітично оцінювати продуктивність мереж, що включають дрони. Це важливо для проектування та розгортання



бездротових мереж з дронами, оскільки дозволяє виявити ключові компроміси та оптимальні параметри налаштування. Наприклад, при оцінці продуктивності мережі з дронами важливо враховувати такі аспекти, як висота польоту дронів, їхня мобільність та тривалість роботи від батареї.

Моделювання мережі для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є складним завданням, яке вимагає використання потужних аналітичних інструментів. У цьому розділі розглянемо основні інструменти, які допомагають у моделюванні та аналізі продуктивності мереж з БПЛА.

Пуассонівський точковий процес (PPP) є одним з основних інструментів для моделювання розташувань вузлів у бездротових мережах. У цьому підході вузли мережі розташовуються випадковим чином у просторі згідно з пуассонівським розподілом. Це дозволяє отримати статистичні характеристики розподілу вузлів та оцінити показники продуктивності мережі, такі як ймовірність покриття та пропускна спроможність.

На рисунку 4.1 наведено приклад 2D пуассонівського точкового процесу для моделювання розташувань користувачів. Цей підхід дозволяє моделювати випадкові розташування вузлів у площині, що є важливим для аналізу продуктивності мережі на великих територіях.

Пуассонівський кластерний процес (PCP) використовується для моделювання групування вузлів у мережі. У цьому підході вузли групуються в кластери, розташовані випадковим чином. Це дозволяє моделювати ситуації, коли вузли мережі утворюють групи або "гарячі точки" з високою щільністю.

На рисунку 4.2 наведено приклад 2D пуассонівського кластерного процесу для моделювання розташувань користувачів. Цей підхід дозволяє врахувати групування вузлів та оцінити їхній вплив на продуктивність мережі, зокрема на інтерференцію та пропускну спроможність.

Процес Matern з жорстким ядром використовується для моделювання розташувань вузлів з обмеженням мінімальної відстані між ними. Це особливо

важливо для мереж з БПЛА, де потрібно уникнути зіткнень між дронами та зменшити інтерференцію.

Цей підхід дозволяє моделювати випадкові розташування вузлів з урахуванням фізичних обмежень на мінімальну відстань між ними. Це допомагає забезпечити стабільну роботу мережі та оптимізувати розташування вузлів для мінімізації інтерференції та максимізації покриття.

Стохастична геометрія забезпечує потужні математичні інструменти для аналітичної оцінки продуктивності мереж з БПЛА. Використовуючи підходи, описані вище, можна отримати точні статистичні характеристики мережі та оцінити її продуктивність у різних сценаріях.

Наприклад, для моделювання розташувань дронів у гарячих точках можна використовувати пуассонівські та біноміальні кластерні процеси. Це дозволяє врахувати групування вузлів та оптимізувати їхнє розташування для забезпечення максимальної пропускної спроможності. Крім того, для забезпечення мінімальної відстані між дронами можна використовувати процеси Matern з жорстким ядром, що допомагає уникнути зіткнень та зменшити інтерференцію.

Загалом, використання стохастичної геометрії та відповідних точкових процесів дозволяє аналітично характеризувати продуктивність мереж з БПЛА, що є важливим кроком для їхнього проектування та розгортання. Це допомагає виявити ключові компроміси та оптимальні параметри налаштування, що забезпечують ефективну роботу мережі у різних умовах та сценаріях.

Аналіз продуктивності бездротових мереж з використанням метрик затримки, пропускної спроможності та надійності є важливим етапом у розробці ефективних систем зв'язку для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці метрики дозволяють оцінити якість обслуговування і виявити можливі проблеми у мережах з БПЛА.

Затримка у бездротових мережах може бути класифікована на затримку керування і затримку користувацької площини. Затримка керування стосується часу, необхідного для переходу з енергоефективного стану (наприклад, режиму очікування) до активного стану з постійною передачею даних. Затримка користувацької площини визначається як час, необхідний для успішної доставки пакету з рівня додатка через радіоінтерфейс.

Для оцінки затримки користувацької площини використовується метод, при якому враховується час від початкової точки сервісної одиниці даних (SDU) до кінцевої точки SDU на радіоінтерфейсі. При цьому передбачається, що ні передавач, ні приймач не обмежені режимом переривчастого прийому (DRX).

Пропускна спроможність мережі визначається як швидкість передачі даних, яку може забезпечити мережа. У випадку мереж з БПЛА, цей показник залежить від різних факторів, включаючи кількість доступних частотних ресурсів, рівень інтерференції та висоту польоту дронів. Наприклад, збільшення кількості фізичних ресурсних блоків (PRBs) для обслуговування повітряного трафіку може значно знизити затримку і підвищити надійність зв'язку, що продемонстровано в табличних результатах досліджень.

Надійність зв'язку визначається як ймовірність успішної доставки пакету з рівня додатка через радіоінтерфейс у межах заданого часу. Для систем з БПЛА висока надійність є критично важливою, особливо для командних і керуючих каналів, де затримки і втрати даних можуть мати серйозні наслідки.

Надійність може бути досягнута за рахунок використання більшої кількості ресурсів, зменшення інтерференції та оптимізації розташування дронів. Наприклад, використання 15 PRBs дозволяє досягти надійності близько 99% на висотах до 100 метрів, що підтверджується симуляційними результатами.

## **2.2 Вивчення торгівельних відносин між пропускною спроможністю, затримкою та надійністю**

Аналіз торгівельних відносин між пропускною спроможністю, затримкою та надійністю є важливим для оптимізації продуктивності бездротових мереж з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). У цьому розділі розглянемо, як ці метрики взаємодіють між собою та які компроміси можуть виникнути під час їх оптимізації.

Пропускна спроможність є одним із найважливіших параметрів, які впливають на загальну продуктивність бездротових мереж, включаючи мережі з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Вона визначає кількість даних, які можуть бути передані мережею за певний проміжок часу. Висока пропускна спроможність зазвичай означає, що мережа може обробляти більше трафіку без втрат якості обслуговування. Однак, існують компроміси між пропускною спроможністю, затримкою та надійністю, які потрібно враховувати при проектуванні та оптимізації мереж з БПЛА.

Затримка визначається як час, необхідний для передачі даних від джерела до призначення. Збільшення пропускної спроможності може знизити затримку, оскільки більше даних може бути передано за той самий проміжок часу. Наприклад, при збільшенні кількості фізичних ресурсних блоків (PRBs) для обслуговування повітряного трафіку, затримка може бути знижена до прийняттого рівня навіть при високих вимогах до обсягу трафіку .

У дослідженнях було показано, що при використанні 15 PRBs можна досягти затримки менше 50 мс з високим рівнем надійності (близько 99%) на висотах до 100 метрів. Це означає, що мережа може ефективно обробляти повітряний трафік без значних затримок, що є критично важливим для управління БПЛА в реальному часі .

Надійність визначається як ймовірність успішної доставки пакету даних без помилок у межах заданого часу. Збільшення пропускної спроможності може покращити надійність зв'язку, оскільки більше ресурсів може бути виділено для корекції помилок та повторної передачі даних. Наприклад, збільшення кількості PRBs дозволяє досягти високого рівня надійності навіть при збільшенні висоти польоту дронів .

Однак, при надмірному збільшенні пропускної спроможності може виникнути проблема інтерференції, що може негативно вплинути на надійність зв'язку. Тому важливо оптимально розподіляти ресурси та мінімізувати інтерференцію для забезпечення стабільного та надійного зв'язку.

Досягнення оптимального балансу між пропускною спроможністю, затримкою та надійністю є ключовим завданням для проектувальників мереж з БПЛА. Висока пропускна спроможність може знизити затримку, але може також збільшити інтерференцію, що негативно вплине на надійність. Тому важливо враховувати всі ці фактори при плануванні та оптимізації мережі.

Наприклад, використання адаптивних алгоритмів управління ресурсами може допомогти досягти оптимального балансу між цими метриками. Ці алгоритми можуть динамічно регулювати параметри передачі даних залежно від умов мережі, забезпечуючи високий рівень продуктивності та надійності зв'язку .

Таким чином, вплив пропускної спроможності на затримку та надійність є важливим фактором, який потрібно враховувати при проектуванні бездротових мереж з БПЛА. Досягнення оптимального балансу між цими метриками дозволяє забезпечити ефективну та надійну роботу мережі у різних умовах та сценаріях застосування.

Затримка є важливим параметром, що впливає на продуктивність бездротових мереж, особливо в контексті мереж з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Вона визначає час, необхідний для передачі даних від

відправника до одержувача, і може мати значний вплив на пропускну спроможність та надійність мережі.

Затримка безпосередньо впливає на пропускну спроможність мережі. Коли затримка висока, передача даних займає більше часу, що зменшує ефективну пропускну спроможність мережі. Наприклад, у сценаріях, де важлива низька затримка, таких як реальний час управління БПЛА, висока затримка може призвести до зниження продуктивності мережі. Висока затримка може спричинити затримку у відповідях системи, що знижує швидкість передачі даних та загальну ефективність мережі.

Для зниження затримки необхідно оптимізувати маршрути передачі даних та мінімізувати кількість проміжних вузлів у мережі. Використання ефективних протоколів передачі та управління ресурсами також допомагає знизити затримку і покращити пропускну спроможність.

Затримка також має суттєвий вплив на надійність мережі. Надійність визначається як ймовірність успішної доставки пакету даних без помилок у межах заданого часу. Висока затримка може збільшити ймовірність втрат даних або помилок під час передачі, що знижує надійність зв'язку. Особливо критичною є висока надійність у системах управління БПЛА, де затримки можуть призвести до втрати контролю над апаратом.

Для підвищення надійності при високій затримці можна використовувати додаткові методи корекції помилок, такі як кодування з виправленням помилок (FEC) та повторна передача даних (ARQ). Це дозволяє зменшити ймовірність втрат даних та забезпечити стабільний зв'язок навіть при наявності затримок.

Досягнення оптимального балансу між затримкою, пропускну спроможністю та надійністю є складним завданням для проєктувальників мереж з БПЛА. Зниження затримки зазвичай покращує пропускну спроможність і надійність, але може вимагати додаткових ресурсів та складних протоколів

управління. З іншого боку, підвищення пропускної спроможності може збільшити затримку через інтерференцію та перевантаження мережі.

Для досягнення оптимального балансу необхідно використовувати адаптивні алгоритми управління ресурсами, які дозволяють динамічно регулювати параметри мережі в залежності від поточних умов. Це включає в себе оптимізацію розташування вузлів, регулювання потужності передавачів та використання ефективних методів модуляції та кодування.

Загалом, вплив затримки на пропускну спроможність та надійність є важливим фактором, який потрібно враховувати при проектуванні бездротових мереж з БПЛА. Досягнення оптимального балансу між цими метриками дозволяє забезпечити ефективну та надійну роботу мережі у різних умовах та сценаріях застосування.

Надійність є ключовою характеристикою бездротових мереж, особливо в контексті безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вона визначає ймовірність успішної доставки даних без помилок у межах заданого часу. Висока надійність забезпечує стабільну роботу мережі, але може впливати на пропускну спроможність та затримку.

Висока надійність зазвичай вимагає додаткових ресурсів для корекції помилок та повторної передачі даних. Це може знизити пропускну спроможність мережі, оскільки більше ресурсів витрачається на забезпечення надійності замість передачі корисних даних. Наприклад, використання методів кодування з виправленням помилок (FEC) та повторної передачі даних (ARQ) може підвищити надійність, але збільшити обсяг переданих даних і знизити ефективну пропускну спроможність.

Забезпечення високої надійності також може призвести до збільшення затримки, оскільки процес корекції помилок та повторної передачі даних займає додатковий час. Наприклад, якщо виникає помилка під час передачі даних, пакет може бути повторно відправлений, що збільшує загальний час передачі. Це може

бути критично важливим у системах, де необхідна низька затримка, таких як реальний час управління БПЛА.

Досягнення оптимального балансу між надійністю, пропускнуою спроможністю та затримкою є складним завданням для проектувальників мереж з БПЛА. Підвищення надійності зазвичай призводить до збільшення затримки та зниження пропускнуої спроможності, оскільки більше ресурсів витрачається на обробку помилок і повторну передачу даних. З іншого боку, зниження надійності може підвищити пропускну спроможність і зменшити затримку, але збільшує ймовірність втрат даних і помилок під час передачі.

Для досягнення оптимального балансу необхідно використовувати адаптивні алгоритми управління ресурсами, які дозволяють динамічно регулювати параметри мережі в залежності від поточних умов. Це включає в себе використання ефективних методів модуляції та кодування, оптимізацію розташування вузлів та регулювання потужності передавачів. Наприклад, можна використовувати методи динамічного розподілу ресурсів, які дозволяють змінювати рівень надійності в залежності від вимог до пропускнуої спроможності та затримки у конкретний момент часу.

Загалом, вплив надійності на пропускну спроможність та затримку є важливим фактором, який потрібно враховувати при проектуванні бездротових мереж з БПЛА. Досягнення оптимального балансу між цими метриками дозволяє забезпечити ефективну та надійну роботу мережі у різних умовах та сценаріях застосування.

### **2.3 Стратегії оптимізації для забезпечення балансу між різними метриками продуктивності**

Оптимізація бездротових мереж для БПЛА вимагає врахування різних метрик продуктивності, таких як пропускну спроможність, затримка та



надійність. Стратегії оптимізації спрямовані на досягнення оптимального балансу між цими метриками для забезпечення ефективної роботи мережі. У цьому розділі розглянемо різні підходи до оптимізації.

Оптимізація розподілу ресурсів є ключовим аспектом для забезпечення ефективної роботи бездротових мереж з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Цей процес включає управління частотними ресурсами, потужністю передавачів та часом передачі даних з метою максимізації продуктивності мережі. Розглянемо основні методи та підходи до оптимізації розподілу ресурсів у таких мережах.

Ефективний розподіл частотних ресурсів є важливим для зниження інтерференції та покращення пропускної спроможності мережі. У мережах з БПЛА частотні ресурси можуть бути розподілені між різними користувачами та базовими станціями. Це дозволяє максимізувати ефективність використання спектру та зменшити вплив інтерференції на продуктивність мережі.

Для досягнення оптимального розподілу частотних ресурсів використовуються різні алгоритми, зокрема, адаптивні алгоритми розподілу, які можуть динамічно регулювати параметри мережі в залежності від поточних умов. Наприклад, у мережах LTE-U, де базові станції можуть використовувати як ліцензовані, так і неліцензовані частоти, оптимальний розподіл спектру може забезпечити високу ефективність і стабільність зв'язку .

Оптимізація потужності передавачів є ще одним важливим аспектом управління ресурсами. Вона дозволяє забезпечити баланс між якістю зв'язку та споживанням енергії. У мережах з БПЛА управління потужністю передавачів є особливо важливим через обмежену ємність батарей дронів.

Для оптимального управління потужністю використовуються різні методи, зокрема, алгоритми зворотного зв'язку, які дозволяють динамічно регулювати потужність передавачів у залежності від поточних умов мережі. Наприклад,

збільшення кількості дронів з кешуванням контенту може зменшити необхідну потужність передачі, що показано на рисунках 5.19 та 5.20 .

Час передачі даних також є критичним ресурсом, який потребує оптимізації. Ефективне управління часом передачі дозволяє зменшити затримки та підвищити пропускну спроможність мережі. У мережах з БПЛА час передачі може бути оптимізований за допомогою методів адаптивного розподілу, які враховують поточні умови трафіку та вимоги користувачів.

Наприклад, використання методів поділу часу для доступу до неліцензованого спектру (як у випадку LTE-U) дозволяє забезпечити високу якість обслуговування користувачів, мінімізуючи при цьому вплив на інші мережі, такі як WiFi .

Використання сучасних технологій модуляції та кодування є важливим аспектом оптимізації бездротових мереж для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці технології дозволяють значно підвищити продуктивність мережі, забезпечити стабільну передачу даних та підвищити надійність зв'язку. Розглянемо основні підходи до використання модуляції та кодування у мережах з БПЛА.

Модуляція є процесом перетворення цифрових сигналів у форму, яка може бути передана через радіоканал. Використання ефективних методів модуляції дозволяє збільшити пропускну спроможність мережі та зменшити вплив інтерференції. Сучасні методи модуляції, такі як ортогональна частотна модуляція (OFDM) та квадратурна амплітудна модуляція (QAM), дозволяють передавати великі обсяги даних з високою швидкістю.

OFDM дозволяє розподіляти сигнал на декілька піднесучих частот, що зменшує вплив багатопроменевості та покращує стійкість до інтерференції. QAM, в свою чергу, забезпечує високу щільність передачі даних, дозволяючи кодувати більше інформації в одному символі. Використання цих методів

модуляції дозволяє підвищити ефективність використання частотного спектру та забезпечити високу швидкість передачі даних.

Кодування є процесом перетворення даних з метою виявлення та виправлення помилок під час передачі через радіоканал. Використання ефективних методів кодування дозволяє підвищити надійність зв'язку, зменшити ймовірність втрат даних та забезпечити стабільну роботу мережі. Одним з найбільш поширених методів кодування є кодування з виправленням помилок (FEC).

FEC дозволяє виявляти та виправляти помилки без необхідності повторної передачі даних. Це особливо важливо у мережах з БПЛА, де висока мобільність та складні умови каналу можуть призвести до частих помилок передачі. Використання FEC дозволяє зменшити затримки та забезпечити високу надійність зв'язку навіть у складних умовах.

Адаптивні схеми модуляції та кодування (AMC) дозволяють динамічно змінювати параметри передачі даних в залежності від умов каналу. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсів мережі, забезпечити високу швидкість передачі та надійність зв'язку. AMC використовує зворотний зв'язок від приймача до передавача для оцінки умов каналу та вибору оптимальних параметрів модуляції та кодування.

Наприклад, у хороших умовах каналу можна використовувати високу швидкість передачі з більш складною модуляцією, такою як 64-QAM. У поганих умовах каналу можна переключитися на простішу модуляцію, таку як QPSK, і використати більш потужні методи кодування для забезпечення надійності.

Оптимізація розташування вузлів мережі є важливим аспектом для забезпечення ефективної роботи бездротових мереж з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Це включає визначення оптимальних місць для розміщення базових станцій та інших мережевих вузлів з метою максимізації покриття та

мінімізації інтерференції. Розглянемо основні підходи та методи, що використовуються для оптимізації розташування вузлів мережі.

Теорія розміщення об'єктів є основою для вирішення задач оптимального розміщення вузлів мережі. Ця теорія фокусується на мінімізації витрат на транспортування між об'єктами та клієнтами шляхом оптимального вибору місць для розміщення об'єктів. Вона включає такі задачі, як визначення оптимальної кількості об'єктів, їх місця розташування та мінімізація загальних витрат.

Для бездротових мереж з БПЛА це означає визначення оптимальних місць для розміщення базових станцій таким чином, щоб мінімізувати відстань між базовими станціями та користувачами мережі, а також зменшити інтерференцію між станціями. Це дозволяє забезпечити високу якість зв'язку та стабільну роботу мережі.

Центральна оптимізація є одним із підходів для вирішення задач розміщення вузлів мережі. Вона включає використання традиційних методів оптимізації, таких як опуклі та неопуклі методи, для визначення оптимальних позицій БПЛА з урахуванням різних метрик, таких як швидкість передачі даних, покриття та споживання енергії.

Зокрема, централізовані алгоритми можуть використовуватися для визначення оптимальних висот та положень БПЛА з метою максимізації продуктивності мережі. Це включає врахування таких факторів, як канал зв'язку, інтерференція між БПЛА та обмеження на енергоспоживання.

Адаптивні схеми розміщення дозволяють динамічно змінювати розташування вузлів мережі в залежності від поточних умов. Це особливо важливо для мереж з БПЛА, де мобільність є однією з ключових характеристик. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє змінювати положення БПЛА в реальному часі для оптимізації покриття та мінімізації інтерференції.

Наприклад, можна використовувати методи машинного навчання для прогнозування потреб користувачів та адаптивного розміщення БПЛА

відповідно до цих потреб. Це дозволяє забезпечити високу якість обслуговування навіть у змінних умовах.

## **Розділ 3. СТРАТЕГІЇ РОЗГОРТАННЯ БПЛА ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ КОМУНІКАЦІЙ**

### **3.1 Теоретичні основи та аналітичні інструменти для оптимального розміщення БПЛА**

Оптимальне розміщення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є важливим завданням для забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж. Для досягнення максимальної продуктивності мережі потрібно враховувати різні параметри, такі як коефіцієнт посилення каналу, інтерференція між БПЛА та середовище розгортання. Окрім цього, слід враховувати обмеження акумуляторів БПЛА, що впливає на продуктивність системи. У цьому розділі описані основні аналітичні інструменти, які можна використовувати для вирішення завдань оптимального розміщення БПЛА у бездротових мережах.

Оптимізація розташування БПЛА є складним завданням, що вимагає вирішення численних оптимізаційних задач. Для цього можна використовувати традиційні методи опуклої та неопуклої оптимізації. Два основні інструменти оптимізаційної теорії, які можуть бути застосовані до проблем оптимізації розміщення БПЛА, це теорія розміщення об'єктів та задачі пакування та покриття кіл.

Теорія розміщення об'єктів розглядає завдання оптимального розміщення об'єктів, таких як базові станції БПЛА, з метою мінімізації витрат на транспортування між об'єктами та користувачами. Ця задача також відома як задача розміщення-розподілу, коли попит всіх користувачів має бути задоволений кількома об'єктами. Основними компонентами цієї задачі є користувачі, об'єкти, простір розташування об'єктів та користувачів, а також

функція мети, яка може враховувати час транспортування, відстань та інші фактори.

Теорія розміщення об'єктів включає декілька категорій задач:

- Проблема медіани: Мета полягає у мінімізації середньої відстані між об'єктами та користувачами.
- Проблема центру: Мета полягає у мінімізації максимальної відстані між користувачем та об'єктом. Цей тип задачі підходить для розміщення аварійних станцій, де відстань до найдалшого пункту попиту не повинна перевищувати задану величину.
- Проблема покриття: Мета полягає у забезпеченні максимально можливого покриття користувачів. У цих задачах важливо, щоб відстань між кожним користувачем та одним з об'єктів не перевищувала заданого порогу. Максимізація покриття для заданої кількості об'єктів відома як задача максимального покриття (MCLP).

Існують також стохастичні та багатокритеріальні задачі розміщення об'єктів, які враховують невизначеність у системі та одночасне досягнення кількох цілей відповідно.

Теорія пакування є класом задач оптимізації, метою яких є оптимальне розміщення об'єктів у контейнерах. Задача пакування має двійкову задачу покриття, в якій мінімізується кількість об'єктів, необхідних для покриття всієї площі контейнера. Наприклад, у задачі пакування кіл розглядається розміщення однакових або різних кіл на заданій площині так, щоб уникнути їх перекриття та досягти максимальної щільності пакування.

Максимальна щільність пакування кіл у двовимірному просторі досягається при шестикутній конфігурації. Ці задачі можуть бути використані для вирішення важливих завдань розміщення БПЛА. Загальна задача пакування сфер є узагальненням задачі пакування кіл, яка зазвичай розглядає однакові сфери.

Використання цих інструментів дозволяє знаходити оптимальні стратегії розміщення БПЛА, що забезпечують максимальне покриття мережі та ефективне використання ресурсів.

Центральна оптимізаційна теорія є важливим інструментом для розміщення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у бездротових мережах. Вона дозволяє вирішувати складні задачі оптимізації, щоб досягти максимальної продуктивності мережі, враховуючи різні показники, такі як швидкість передачі даних, покриття та енергоспоживання. В цьому розділі ми розглянемо два основні інструменти оптимізаційної теорії: теорію розміщення об'єктів і задачі пакування та покриття кіл.

Теорія розміщення об'єктів займається задачами оптимального розташування об'єктів, таких як базові станції БПЛА, щоб мінімізувати витрати на транспортування між об'єктами та користувачами. Ця задача також відома як задача розміщення-розподілу, коли попит усіх користувачів має бути задоволений кількома об'єктами. Основними компонентами цієї задачі є користувачі, об'єкти, простір розташування об'єктів та користувачів, а також функція мети, яка може враховувати час транспортування, відстань та інші фактори.

1. Проблема медіани: Мета полягає у мінімізації середньої відстані між об'єктами та користувачами.
2. Проблема центру: Мета полягає у мінімізації максимальної відстані між користувачем та об'єктом. Цей тип задачі підходить для розміщення аварійних станцій, де відстань до найдалшого пункту попиту не повинна перевищувати задану величину.
3. Проблема покриття: Мета полягає у забезпеченні максимально можливого покриття користувачів. У цих задачах важливо, щоб відстань між кожним користувачем та одним з об'єктів не перевищувала заданого



порогу. Максимізація покриття для заданої кількості об'єктів відома як задача максимального покриття (MCLP).

Існують також стохастичні та багатокритеріальні задачі розміщення об'єктів. Стохастичні задачі враховують невизначеність у системі, наприклад, випадкові запити користувачів. Багатокритеріальні задачі враховують одночасно декілька критеріїв, що дозволяє знаходити рішення з врахуванням компромісів між різними цілями.

Теорія пакування є класом задач оптимізації, метою яких є оптимальне розміщення об'єктів у контейнерах. Задача пакування має двійкову задачу покриття, в якій мінімізується кількість об'єктів, необхідних для покриття всієї площі контейнера. Наприклад, у задачі пакування кіл розглядається розміщення однакових або різних кіл на заданій площині так, щоб уникнути їх перекриття та досягти максимальної щільності пакування.

Максимальна щільність пакування кіл у двовимірному просторі досягається при шестикутній конфігурації. Ці задачі можуть бути використані для вирішення важливих завдань розміщення БПЛА. Загальна задача пакування сфер є узагальненням задачі пакування кіл, яка зазвичай розглядає однакові сфери.

Для розміщення базових станцій БПЛА можна використовувати теорію розміщення об'єктів для мінімізації витрат на розгортання та експлуатацію мережі. Наприклад, можна визначити оптимальну кількість та місця розташування базових станцій БПЛА, щоб мінімізувати загальні витрати на транспортування та будівництво.

Задачі пакування та покриття кіл можуть бути використані для оптимізації розміщення БПЛА з урахуванням покриття заданої території. Наприклад, задача максимального покриття може бути використана для забезпечення того, щоб кожен користувач мав доступ до базової станції БПЛА на відстані, меншій за заданий поріг.

Використання цих інструментів дозволяє знаходити оптимальні стратегії розміщення БПЛА, що забезпечують максимальне покриття мережі та ефективне використання ресурсів, зменшуючи витрати на транспортування та будівництво базових станцій БПЛА.

Оптимізація висоти та розміщення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ключовим аспектом для забезпечення максимальної продуктивності бездротових мереж. Вона враховує кілька факторів, таких як висота польоту, передавальна потужність, ширина антенного променя та кількість БПЛА. У цьому розділі розглядаються основні підходи до визначення оптимальної висоти та розміщення БПЛА для максимізації покриття та мінімізації інтерференції.

Для оптимального розміщення базових станцій БПЛА (UAV BSs) необхідно врахувати кілька параметрів. Основні параметри включають висоту польоту БПЛА, потужність передачі та антенні характеристики. Наприклад, модель розгортання може враховувати середню втрату шляху сигналу та ймовірність прямої видимості (LOS) між БПЛА та користувачами на землі .

Залежність покриття БПЛА від висоти польоту є важливим фактором. Збільшення висоти польоту БПЛА призводить до збільшення втрат сигналу, але водночас збільшує ймовірність прямої видимості (LOS), що збільшує радіус покриття. Однак, збільшення кількості БПЛА може призвести до збільшення інтерференції між ними, оскільки вони будуть розташовані ближче один до одного .

Радіус покриття кожного БПЛА визначається як максимальна відстань, на якій ймовірність покриття для користувача на землі перевищує заданий поріг. Цей радіус є функцією ширини антенного променя, передавальної потужності, порогу покриття, кількості БПЛА та їх розташування. Матеріально, радіус покриття БПЛА можна виразити формулою:

$$r_u = \max\{r | P_{cov}(r, P_t, \theta_B) \geq \varepsilon\}$$

де  $P_{cov}$  – ймовірність покриття,  $P_t$  – передавальна потужність,  $\theta_B$  – ширина антенного променя,  $\varepsilon$  – поріг покриття .

Для забезпечення максимального покриття без перекриття зон покриття БПЛА використовуються різні підходи до розміщення. Один з таких підходів базується на теорії пакування кіл, яка дозволяє розташовувати БПЛА так, щоб максимізувати щільність пакування без перекриття їх зон покриття. Це дозволяє визначити оптимальні тривимірні позиції БПЛА разом з їх радіусом покриття .

Симуляційні результати показують, що оптимальна висота БПЛА залежить від їх кількості. Збільшення кількості БПЛА призводить до зниження висоти польоту для уникнення перекриття зон покриття та мінімізації інтерференції. Наприклад, при збільшенні кількості БПЛА з 3 до 6, висота польоту зменшується з 2000 м до 1300 м. Крім того, використання спрямованих антен з більшою шириною променя також знижує висоту польоту БПЛА .

Розрахунки показують, що для досягнення заданого покриття потрібна мінімальна кількість БПЛА залежить від розміру цільової географічної області. Наприклад, для досягнення 70% покриття для області з радіусом менш ніж 5400 м необхідно розгорнути один або більше БПЛА. Однак для покриття більшої області потрібно більше БПЛА .

Таким чином, оптимізація висоти та розміщення БПЛА є складним завданням, яке вимагає врахування багатьох факторів для досягнення максимальної ефективності мережі. Використання аналітичних інструментів та моделей, таких як теорія пакування кіл, дозволяє знайти оптимальні стратегії розміщення БПЛА, що забезпечують максимальне покриття та ефективне використання ресурсів.

### **3.2 Моделі розгортання для максимізації покриття та ефективності мережі**

Моделі розгортання для максимізації покриття є ключовими для забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Правильне розміщення БПЛА значно впливає на здатність мережі забезпечувати якісний зв'язок та обслуговувати велику кількість користувачів. У цьому підрозділі ми розглянемо основні підходи та моделі, які використовуються для досягнення максимально можливого покриття території.

Розгортання БПЛА вимагає врахування тривимірного простору, оскільки БПЛА можуть змінювати як горизонтальні, так і вертикальні позиції. Це відкриває нові можливості для оптимізації покриття у порівнянні з традиційними наземними базовими станціями. Основними факторами, що впливають на покриття, є висота польоту БПЛА, їх кількість, потужність передачі та антени, які використовуються на борту.

Висота польоту БПЛА є важливим параметром, що впливає на радіус покриття та якість зв'язку. Збільшення висоти польоту збільшує радіус покриття за рахунок зменшення перешкод, таких як будівлі чи дерева, які можуть блокувати сигнал. Однак це також збільшує втрати сигналу через більшу відстань до користувачів на землі. Таким чином, оптимальна висота повинна враховувати баланс між збільшенням покриття та зменшенням втрат сигналу.

Кількість БПЛА та їх розміщення є критичними для досягнення максимального покриття. Використання більшої кількості БПЛА дозволяє покращити покриття та зменшити навантаження на кожен окремий БПЛА, що покращує якість зв'язку та продуктивність мережі. Для визначення оптимальних позицій БПЛА використовуються різні математичні моделі та алгоритми, включаючи теорію пакування кіл та алгоритми оптимізації на основі штучного інтелекту.

Теорія пакування кіл є потужним інструментом для розміщення БПЛА з метою максимального покриття. Ця теорія дозволяє розташовувати БПЛА так,

щоб їх зони покриття максимально перекривали територію без значного перекриття один з одним. Наприклад, у задачі максимального покриття кіл використовується гексагональна конфігурація, яка забезпечує найефективніше покриття площі.

Математично, розташування БПЛА може бути описане формулою, що враховує їх радіус покриття, висоту польоту та ширину антенного променя:

$$r_u = \max\{r | P_{cov}(r, P_t, \theta_B) \geq \varepsilon\}$$

де  $P_{cov}$  – ймовірність покриття,  $P_t$  – передавальна потужність,  $\theta_B$  – ширина антенного променя,  $\varepsilon$  – поріг покриття. Використання цієї моделі дозволяє знаходити оптимальні позиції для кожного БПЛА, забезпечуючи максимальне покриття території.

Симуляції показують, що оптимальне розміщення БПЛА залежить від конкретних умов та параметрів мережі. Наприклад, для досягнення 70% покриття області з радіусом до 5400 м може знадобитися від одного до кількох БПЛА. Чим більша територія, тим більше БПЛА необхідно для забезпечення якісного покриття. Розрахунки також показують, що збільшення кількості БПЛА зменшує висоту їх польоту для уникнення перекриття зон покриття та мінімізації інтерференції.

Таким чином, моделі розгортання для максимізації покриття є важливим інструментом для забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж з використанням БПЛА. Використання математичних моделей та симуляцій дозволяє знаходити оптимальні стратегії розміщення, що забезпечують максимальне покриття та мінімізують втрати сигналу.

Оптимізація розгортання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є важливим завданням для забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж. Особливу увагу слід приділити мінімізації інтерференції між БПЛА, що значно впливає на якість зв'язку та продуктивність мережі. У цьому

розділі ми розглянемо підходи та стратегії, які дозволяють оптимізувати розгортання БПЛА з метою зменшення інтерференції.

Висота польоту БПЛА є важливим параметром, що впливає на інтерференцію. Збільшення висоти польоту дозволяє зменшити інтерференцію завдяки збільшенню відстані між БПЛА та користувачами на землі, а також між самими БПЛА. Однак, висота повинна бути оптимальною, щоб забезпечити достатнє покриття та зменшити втрати сигналу. Оптимізація висоти польоту дозволяє знайти баланс між покриттям та мінімізацією інтерференції.

Для мінімізації інтерференції використовуються різні моделі та підходи до розгортання БПЛА. Одним з таких підходів є використання теорії пакування кіл, яка дозволяє розташовувати БПЛА так, щоб їх зони покриття мінімально перекривалися. Це дозволяє уникнути взаємної інтерференції між сусідніми БПЛА. Наприклад, розташування БПЛА на основі гексагональної конфігурації дозволяє максимально зменшити перекриття зон покриття та інтерференцію.

Іншим підходом є використання спрямованих антен з вузькими променями. Це дозволяє зосередити сигнал у певному напрямку, зменшуючи інтерференцію з іншими БПЛА. Використання спрямованих антен також дозволяє зменшити енергоспоживання, оскільки сигнал передається лише в потрібному напрямку, а не в усі сторони одночасно.

Для оптимізації розгортання БПЛА використовуються різні алгоритми, такі як алгоритми рою частинок, генетичні алгоритми та методи машинного навчання. Ці алгоритми дозволяють знаходити оптимальні позиції для розташування БПЛА, враховуючи такі параметри, як висота польоту, потужність передачі, ширина антенного променя та інтерференція.

Алгоритм рою частинок є одним з методів, які можуть бути використані для оптимізації розгортання БПЛА. Цей алгоритм базується на поведінці групи частинок, які рухаються в пошуках оптимального розв'язку. Кожна частинка

представляє можливе розташування БПЛА, і алгоритм намагається знайти таке розташування, яке мінімізує інтерференцію та забезпечує максимальне покриття.

Генетичні алгоритми є іншим підходом, який можна використовувати для оптимізації розгортання БПЛА. Ці алгоритми базуються на природних процесах еволюції, таких як відбір, схрещування та мутація. Генетичні алгоритми дозволяють знаходити оптимальні рішення шляхом ітеративного поліпшення набору можливих рішень.

Симуляції показують, що використання оптимальних стратегій розгортання дозволяє значно зменшити інтерференцію між БПЛА. Наприклад, розміщення БПЛА на основі теорії пакування кіл та використання спрямованих антен з вузькими променями дозволяє знизити інтерференцію до мінімуму. Це забезпечує стабільний зв'язок та високу якість обслуговування користувачів на землі.

Таким чином, оптимізація розгортання БПЛА для мінімізації інтерференції є важливим завданням для забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж. Використання математичних моделей, алгоритмів оптимізації та спрямованих антен дозволяє досягти максимального покриття з мінімальним рівнем інтерференції, що забезпечує високу якість зв'язку та продуктивність мережі.

Моделі розгортання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для енергоефективного збирання даних є важливим аспектом, особливо у випадках, коли мова йде про Інтернет речей (IoT) з пристроями, що обмежені в енергії. Оптимізація енергоефективності допомагає продовжити час автономної роботи БПЛА та зменшити загальні витрати на експлуатацію. У цьому розділі розглянуто основні підходи до оптимізації розміщення БПЛА з метою підвищення енергоефективності.

Енергоефективність при збиранні даних включає мінімізацію енергоспоживання як самих БПЛА, так і наземних пристроїв, з якими вони

взаємодіють. Зокрема, у випадку IoT пристроїв, таких як радіочастотні ідентифікаційні пристрої (RFID) та сенсори, необхідно забезпечити ефективне збирання даних з мінімальним використанням енергії.

Одним з ключових аспектів є оптимізація тривимірного розміщення та мобільності БПЛА для забезпечення енергоефективного збирання даних. Це включає визначення оптимальних позицій для розташування БПЛА, а також правил асоціації між БПЛА та наземними пристроями. Оптимальне розміщення БПЛА дозволяє мінімізувати відстані передачі даних, що знижує енергоспоживання як БПЛА, так і наземних пристроїв.

1. **Модель оптимального розміщення:** Розміщення БПЛА на основі теорії пакування кіл дозволяє мінімізувати перекриття зон покриття та інтерференцію, що знижує витрати енергії на передачу даних. Використання гексагональної конфігурації розташування дозволяє максимально ефективно використовувати наявні ресурси.

2. **Використання спрямованих антен:** Використання спрямованих антен з вузькими променями дозволяє концентрувати сигнал у певному напрямку, що зменшує втрати енергії та підвищує ефективність передачі даних. Це також дозволяє зменшити інтерференцію між сусідніми БПЛА.

3. **Алгоритми оптимізації:** Застосування різних алгоритмів оптимізації, таких як алгоритми рою частинок та генетичні алгоритми, дозволяє знаходити оптимальні позиції для розташування БПЛА з урахуванням енергоефективності. Ці алгоритми дозволяють враховувати різні параметри, такі як висота польоту, потужність передачі та кількість БПЛА.

Для підвищення енергоефективності збору даних можна використовувати різні стратегії, такі як періодичне збирання даних, де БПЛА здійснюють обльоти за певними маршрутами з оптимальними зупинками для збору даних з наземних



пристроїв. Інша стратегія включає використання стаціонарних БПЛА з динамічним регулюванням висоти та положення для мінімізації витрат енергії.

Симуляційні результати показують, що оптимальне розміщення БПЛА значно знижує енергоспоживання мережі. Наприклад, використання гексагональної конфігурації розміщення БПЛА та спрямованих антен дозволяє знизити енергоспоживання до мінімуму. Це забезпечує стабільне збирання даних з IoT пристроїв з мінімальними витратами енергії.

Таким чином, моделі розгортання з урахуванням енергоефективності є важливим аспектом для забезпечення ефективного функціонування бездротових мереж з використанням БПЛА. Використання оптимальних стратегій розміщення та передових алгоритмів дозволяє досягти максимального покриття з мінімальним рівнем енергоспоживання, що забезпечує високу якість зв'язку та продуктивність мережі .

### **3.3 Проактивні стратегії розгортання з кешуванням для поліпшення продуктивності мережі**

Використання машинного навчання для передбачення мобільності користувачів є важливим аспектом у розробці проактивних стратегій розгортання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Це дозволяє забезпечити ефективне розміщення БПЛА, враховуючи рух користувачів, їхні потреби в контенті та вимоги до якості обслуговування (QoE). У цьому розділі ми розглянемо основні підходи до використання машинного навчання для передбачення мобільності користувачів і їхньої інтеграції в стратегії розгортання БПЛА.

Для передбачення мобільності користувачів зазвичай використовуються періодичні моделі, що враховують регулярні переміщення користувачів між різними локаціями, такими як робота, дім або місця відпочинку. Ці моделі

дозволяють прогнозувати майбутні переміщення користувачів на основі історичних даних про їхню мобільність. Зокрема, у хмарній радімережі (CRAN) центральний хмарний сервер збирає інформацію про місцезнаходження користувачів кожного визначеного періоду часу, що дозволяє аналізувати їхні переміщення та адаптувати стратегії розгортання БПЛА.

Для передбачення мобільності користувачів у CRAN використовуються інструменти машинного навчання, такі як рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема мережі з обмеженими станами (ESN). Ці моделі дозволяють ефективно навчатися на основі історичних даних про переміщення користувачів і передбачати їхні майбутні місцезнаходження. Наприклад, концепторні ESN розділяють поведінку користувачів на кілька патернів і навчаються на них окремо, що значно підвищує точність прогнозування порівняно з класичними ESN-алгоритмами.

У розглянутій моделі користувачі, які не обслуговуються наземними базовими станціями (RRH), будуть підключатися до БПЛА. Інші користувачі розподіляються на кілька кластерів, кожен з яких обслуговується окремим БПЛА. Оптимізація розміщення БПЛА та визначення контенту, який буде кешуватися на них, здійснюється на основі передбачень про переміщення користувачів та їхні запити на контент. Це дозволяє забезпечити якість обслуговування користувачів (QoE) при мінімальному споживанні енергії БПЛА.

Для досягнення оптимального розгортання БПЛА, що враховує передбачення мобільності користувачів, використовується алгоритм K-means для кластеризації користувачів. Це дозволяє групувати користувачів у кластери, кожен з яких обслуговується окремим БПЛА. Оптимальний набір контенту для кешування на БПЛА визначається на основі зменшення передавальної потужності БПЛА. Використання концепторних ESN дозволяє значно знизити енергоспоживання та підвищити точність передбачення мобільності користувачів.

Симуляційні результати показують, що використання концепторних ESN дозволяє знизити передавальну потужність БПЛА на 17% порівняно з класичними ESN-алгоритмами. Оптимальне розгортання БПЛА з кешуванням контенту може знизити передавальну потужність на 32% порівняно з випадковим кешуванням. Збільшення кількості БПЛА також дозволяє знижувати передавальну потужність кожного БПЛА, що сприяє більш ефективному використанню енергії та покращенню якості обслуговування користувачів.

Таким чином, використання машинного навчання для передбачення мобільності користувачів є важливим елементом у розробці проактивних стратегій розгортання БПЛА. Застосування передових алгоритмів машинного навчання дозволяє оптимізувати розміщення БПЛА, знижувати енергоспоживання та забезпечувати високу якість обслуговування користувачів у бездротових мережах.

Проактивне кешування контенту є важливою стратегією для покращення продуктивності мереж з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Цей підхід дозволяє знизити затримки при доступі до даних та зменшити навантаження на мережу, що в свою чергу покращує якість обслуговування користувачів (QoE). У цьому розділі ми розглянемо основні методи та моделі проактивного кешування контенту з використанням БПЛА.

Проактивне кешування контенту передбачає зберігання популярного або передбаченого контенту на БПЛА до моменту його запиту користувачами. Це дозволяє значно зменшити затримки при доставці контенту, оскільки користувачі можуть отримувати необхідну інформацію безпосередньо від БПЛА, а не чекати на передачу з центрального сервера.

Для ефективного проактивного кешування необхідно враховувати кілька факторів, включаючи патерни запитів користувачів, мобільність користувачів та доступні ресурси кешування на БПЛА. Основні моделі кешування включають:

1. Модель прогнозування запитів: Використання машинного навчання для аналізу історичних даних про запити користувачів дозволяє прогнозувати, який контент буде затребуваний у майбутньому. Наприклад, рекурентні нейронні мережі (RNN) можуть бути використані для передбачення патернів запитів та мобільності користувачів.

2. Модель асоціації користувачів з БПЛА: Оптимальна асоціація користувачів з конкретними БПЛА дозволяє забезпечити мінімальну затримку та високу якість обслуговування. Наприклад, алгоритм кластеризації K-means може бути використаний для групування користувачів у кластери, кожен з яких обслуговується окремим БПЛА.

3. Модель оновлення кешу: Оскільки патерни запитів користувачів можуть змінюватися з часом, важливо регулярно оновлювати кешований контент на БПЛА. Для цього можна використовувати адаптивні алгоритми, які враховують зміни в поведінці користувачів та автоматично оновлюють кеш.

Для досягнення оптимального кешування контенту використовуються різні алгоритми оптимізації. Основні підходи включають:

- Алгоритми на основі машинного навчання: Використання алгоритмів машинного навчання, таких як рекурентні нейронні мережі (RNN), дозволяє передбачати патерни запитів користувачів та мобільність, що допомагає оптимізувати розташування та кешування контенту на БПЛА.
- Алгоритм K-means: Цей алгоритм дозволяє ефективно групувати користувачів у кластери для оптимального обслуговування БПЛА. Користувачі, які знаходяться в одному кластері, можуть бути обслуговувані одним БПЛА, що знижує затримку та покращує якість обслуговування.
- Адаптивні алгоритми оновлення кешу: Ці алгоритми автоматично оновлюють кешований контент на БПЛА на основі поточних патернів запитів користувачів та змін у їх поведінці.

Симуляційні результати показують, що використання проактивного кешування контенту значно знижує затримки та покращує якість обслуговування користувачів. Наприклад, порівняно з класичними методами кешування, проактивне кешування з використанням концепторних рекурентних нейронних мереж (ESN) дозволяє знизити потужність передавача БПЛА на 17%, а також зменшити загальну потужність передавача на 32% порівняно з випадковим кешуванням.

Таким чином, проактивне кешування контенту є ефективною стратегією для зменшення затримок та покращення продуктивності мереж з використанням БПЛА. Використання алгоритмів машинного навчання, оптимізаційних моделей та адаптивних алгоритмів оновлення кешу дозволяє досягти високої якості обслуговування та мінімізувати затримки при доставці контенту користувачам.

Інтеграція стратегій кешування з оптимізацією розгортання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ключовим аспектом для забезпечення високої продуктивності мережі. Поєднання цих підходів дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси мережі, знижуючи затримки при доставці контенту та мінімізуючи енергоспоживання. У цьому розділі ми розглянемо основні методи та моделі інтеграції кешування та розгортання БПЛА.

Інтеграція стратегій кешування з оптимізацією розгортання передбачає розміщення БПЛА таким чином, щоб забезпечити максимальне покриття території та зберігати на них популярний контент, який користувачі запитують найчастіше. Це дозволяє зменшити затримки при доступі до контенту, оскільки користувачі можуть отримати необхідну інформацію безпосередньо від БПЛА, а не чекати на передачу з центрального сервера.

Для оптимального обслуговування користувачів використовуються алгоритми кластеризації, такі як алгоритм K-means, який групує користувачів у кластери. Кожен кластер обслуговується окремим БПЛА. Це дозволяє ефективно розподілити навантаження між БПЛА та забезпечити мінімальні затримки при

передачі даних. Асоціація користувачів з конкретними БПЛА визначається на основі їх мобільності та патернів запитів на контент .

Для визначення оптимального контенту, який буде кешуватися на БПЛА, використовується модель прогнозування запитів користувачів. Використання алгоритмів машинного навчання, таких як рекурентні нейронні мережі (RNN), дозволяє аналізувати історичні дані про запити користувачів та передбачати майбутні запити. Це допомагає оптимізувати розташування та кешування контенту на БПЛА, знижуючи затримки при доступі до даних .

Для досягнення оптимального розгортання БПЛА необхідно враховувати такі параметри, як висота польоту, потужність передачі та кількість БПЛА. Використання теорії пакування кіл дозволяє мінімізувати перекриття зон покриття та знизити інтерференцію між БПЛА. Оптимізація розміщення також включає врахування патернів мобільності користувачів та їх запитів на контент, що дозволяє забезпечити високу якість обслуговування (QoE) .

Для інтеграції стратегій кешування та розгортання використовуються різні алгоритми оптимізації:

- ✓ Рекурентні нейронні мережі (RNN): Використання RNN дозволяє передбачати патерни мобільності користувачів та їхні запити на контент, що допомагає оптимізувати розміщення та кешування контенту на БПЛА.
- ✓ Алгоритм K-means: Цей алгоритм використовується для кластеризації користувачів та визначення оптимальної асоціації користувачів з БПЛА.
- ✓ Адаптивні алгоритми оновлення кешу: Ці алгоритми автоматично оновлюють кешований контент на БПЛА на основі поточних патернів запитів користувачів та змін у їх поведінці.

Симуляційні результати показують, що інтеграція стратегій кешування з оптимізацією розгортання дозволяє значно знизити затримки та підвищити якість обслуговування користувачів. Наприклад, використання концепторних рекурентних нейронних мереж (ESN) дозволяє знизити потужність передавача

БПЛА на 17%, а оптимальне розгортання та кешування контенту знижує загальну потужність передавача на 32% порівняно з випадковим кешуванням .

Таким чином, інтеграція стратегій кешування з оптимізацією розгортання є важливим аспектом для забезпечення високої продуктивності мережі з використанням БПЛА. Використання передових алгоритмів машинного навчання та оптимізаційних моделей дозволяє досягти максимального покриття, мінімізувати затримки та забезпечити високу якість обслуговування користувачів.

## **ВИСНОВКИ**

У ході написання дипломної роботи на тему "Розробка адаптивних бездротових мереж для управління безпілотними літальними апаратами" було проведено комплексне дослідження проблематики управління БПЛА в умовах сучасного розвитку бездротових технологій.

Було здійснено аналіз конструктивних особливостей та функціональних можливостей адаптивних бездротових мереж для управління БПЛА. В рамках роботи розглянуто основні явища радіохвильового поширення, включаючи відбиття, дифракцію, рефракцію, розсіювання та поглинання. На основі цього аналізу було створено математичні моделі для оцінки якості зв'язку, які враховують великомасштабні та маломасштабні ефекти поширення сигналу.

У процесі дослідження було розроблено та валідувано адаптивні алгоритми управління ресурсами, що дозволяють динамічно регулювати параметри мережі залежно від поточних умов експлуатації. Це забезпечує надійну передачу даних та стабільність управління БПЛА, мінімізуючи затримки та знижуючи ймовірність втрати сигналу.

Також було проведено комп'ютерне моделювання та емпіричні дослідження, результати яких підтвердили високу точність запропонованих моделей та їх відповідність реальним умовам. Це дозволило розробити практичні рекомендації щодо оптимізації бездротових мереж для управління БПЛА, що включають ефективне використання частотних ресурсів, мінімізацію інтерференції та забезпечення високої пропускну здатності.

Запропоновані в роботі рішення та рекомендації можуть бути впроваджені в реальні системи управління БПЛА, підвищуючи їхню ефективність та надійність. Це сприятиме розвитку інфраструктури для безпілотних літальних апаратів, розширенню їх застосування в різних сферах та підвищенню безпеки їх експлуатації.

Таким чином, результати виконаної роботи мають важливе наукове та практичне значення, сприяють подальшому розвитку технологій управління безпілотними літальними апаратами та можуть бути основою для майбутніх досліджень у цій галузі.





## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**