

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до дипломної роботи  
фахового молодшого бакалавра**

на тему: **Дослідження характеристик міліметрових хвиль у каналах зв'язку з БПЛА**

Виконав студент IV курсу, групи ТК-41 спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка  
ОПП «Телекомунікації та комп'ютерні технології»

**Ющак Ярема Андрійович**

Керівник	_____	Ігор ЧАЙКОВСЬКИЙ
	(підпис)	
Нормоконтролер	_____	Володимир ПЛІШ
	(підпис)	
Рецензент	_____	Володимир СТАХІВ
	(підпис)	
Голова ЕК	_____	Андрій ВАХ
	(підпис)	
Члени ЕК	_____	Ігор ТИБЕЛЬ
	(підпис)	
	_____	Володимир ПЛІШ
	(підпис)	

Дипломна робота захищена в ЕК «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

з оцінкою «\_\_\_\_\_»

Львів 2025

**ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Циклова комісія	<i>Телекомунікації</i>
Освітньо-професійний ступінь	<i>Фаховий молодший бакалавр</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Телекомунікації та комп'ютерні технології</i>
Спеціальність	<i>172 Телекомунікації та радіотехніка</i>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач відділення  
«Телекомунікацій та  
комп'ютерних технологій»  
\_\_\_\_\_ Ігор ТИБЕЛЬ  
« 25 » квітня 2025 року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

*Ющаку Яремі Андрійовичу*

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи	<i>Дослідження характеристик міліметрових хвиль у каналах зв'язку з БПЛА</i>
----------------	--

керівник роботи	<i>Ігор ЧАЙКОВСЬКИЙ, к.т.н., викладач вищої категорії</i>
-----------------	---

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

затверджені наказом директора від “ 20 ” березня 2025 року № 20-СТ

2. Строк подання студентом роботи “10” червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи 3.1 *Проаналізувати загальну характеристику БПЛА*

3.2 *Розглянути концепції інтегрованої мережі, що об'єднує космічні, повітряні та земельні системи з використанням БПЛА;*

3.3 *Використати передачу NOMA для безпілотних літальних апаратів*

3.4 *Описати систему, що імітує використання міліметрового діапазону*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

4.1 *Класифікація та характеристики БПЛА*

4.2 *Дослідження використання безпілотних літальних апаратів у радіомережах міліметрового діапазону*

4.3 *Аналіз використання безпілотних літальних апаратів з технологією міліметрового діапазону*

4.4 *Техніко-економічне обґрунтування.*

4.5 *Охорона праці та безпека життєдіяльності*

## 5. Перелік графічного матеріалу

5.1.	<i>Види БПЛА</i>
5.2.	<i>Приклад організації роботи базової станції</i>
5.3.	<i>Представлення інтегрованих мереж, що об'єднують космічний, повітряний та земельний сегменти</i>
5.4.	<i>Сценарій використання БПЛА як повітряні базові станції для забезпечення зв'язку в певній області, комунікуючи з наземними користувачами та іншими БПЛА</i>
5.5.	<i>Схема для використання НОМА з БПЛА</i>

## 6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання отримав
Техніко-економічне обґрунтування	<i>Мар'яна СМУК викладач вищої категорії</i>	<i>25.04.2025р.</i>	<i>25.04.2025р</i>
Охорона праці та безпека життєдіяльності	<i>Олена МЕЛЬНИКОВА викладач першої категорії</i>	<i>25.04.2025р.</i>	<i>25.04.2025р.</i>

7. Дата видачі завдання « 25 » квітня 2025 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	<i>25.04-01.05</i>	
2	<i>Класифікація та характеристики БПЛА</i>	<i>02.05-08.05</i>	
3	<i>Дослідження використання безпілотних літальних апаратів у радіомережах міліметрового діапазону</i>	<i>09.05-15.05</i>	
4	<i>Аналіз використання безпілотних літальних апаратів з технологією міліметрового діапазону</i>	<i>16.05-22.05</i>	
5	<i>Техніко – економічне обґрунтування</i>	<i>23.05-29.05</i>	
6	<i>Охорона праці та безпека життєдіяльності</i>	<i>30.05-03.06</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>04.06-05.06</i>	
8	<i>Підготовка графічного матеріалу.</i>	<i>06.06-09.06</i>	

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ярема ЮЩАК

\_\_\_\_\_ (ім'я, прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ігор ЧАЙКОВСЬКИЙ

\_\_\_\_\_ (ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 70 с., 21 рис., 2 табл., 8 джерел.

Об'єкт дослідження – БПЛА

Мета роботи – є вивчення потенційних можливостей та викликів використання міліметрового діапазону для забезпечення зв'язку з БПЛА.

Метод дослідження – метод дослідження, метод порівняння, метод синтезу і аналізу, метод класифікації.

У роботі досліджуються технічні аспекти, включаючи параметри каналу зв'язку, властивості поширення сигналу, потужність передавачів, антени та модуляційні техніки. Особлива увага приділяється вирішенню проблем зв'язку в умовах обмеженої пропускної здатності та високої шумової активності, які є типовими для міліметрового діапазону.

Дослідження базується на аналізі вже існуючих методик, проведенні моделювання та випробувань у реальних умовах. Отримані результати дозволять визначити переваги та недоліки використання міліметрового діапазону для зв'язку з БПЛА, а також визначити оптимальні стратегії впровадження цієї технології.

**БЕЗПЛОТНИЙ ЛІТАЮЧИЙ АПАРАТ, МОБІЛЬНА БАЗОВА СТАНЦІЯ  
5G, ШИРОКОСМУГОВИЙ ДІАПАЗОН.**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ БПЛА .....	8
1.1 Загальна характеристика БПЛА .....	8
1.2 БПЛА з фіксованим крилом.....	10
1.3 БПЛА з гвинтовим крилом .....	11
1.4 Дрон на прив'язі .....	12
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У РАДІОМЕРЕЖАХ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ .....	14
2.1 Розгляд концепції інтегрованої мережі, що об'єднує космічні, повітряні та земельні системи з використанням БПЛА .....	14
2.2 Використання передачі NOMA для безпілотних літальних апаратів .....	22
2.3 Мережі когнітивних БПЛА.....	24
2.4 Системи БПЛА з орієнтацією на енергоефективність.....	25
2.5 Використання БПЛА в гетерогенних мережах (HetNets).....	29
2.6 Використання зв'язку D2D та БПЛА у спільній мережі.....	31
2.7 Мережі з програмно-визначеними функціями SDN для безпілотних літальних апаратів.....	32
2.8 Використання безпілотних літальних апаратів БПЛА у мережах обчислення на базі МЕС.....	34
2.9 Використання БПЛА для зберігання та швидкого доступу до кешованих даних.....	36
3 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ТЕХНОЛОГІЄЮ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ .....	38
3.1 Опис системи, що імітує використання міліметрового діапазону.....	38
3.2 Моделювання передачі сигналу в системі міліметрового діапазону між БПЛА та БС, а також у режимі ретрансляції.....	46
3.3 Перегляд аналізу отриманих результатів.....	50
4 ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	53
4.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку.....	53
4.2 Складові структури витрат на розробку.....	53

4.3 Витрати на відлагодження розробки.....	55
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЕДІЯЛЬНОСТІ.....	57
5.1 Загальні положення.....	57
5.2 Організація охорони праці на підприємстві.....	58
5.3 Заходи безпеки на робочому місці.....	60
5.4 Санітарно-гігієнічні вимоги.....	61
ВИСНОВКИ .....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	64
КОПІЇ ОBOB'ЯЗКОВИХ КРЕСЛЕНЬ.....	65
Лист 1 Види БПЛА .....	66
Лист 2 Приклад організації роботи базової станції.....	67
Лист 3 Представлення інтегрованих мереж, що об'єднують космічний, повітряний та земельний сегменти .....	68
Лист 4 Сценарій використання БПЛА.....	69
Лист 5 Схема для використання НОМА з БПЛА .....	70

## ВСТУП

Зростання популярності Інтернет речей (IoT) і безпілотних систем повинно значно збільшити трафік мобільних даних, особливо в контексті розвитку мережі 5G. Це є викликом для існуючих мереж, і тут безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть грати важливу роль у розв'язанні деяких із цих викликів.

БПЛА має потенціал використовуватися для розширення мережевої інфраструктури в країні, де існує велике скупчення користувачів або де виникли проблеми через стихійний лих або інші непередбачувані характеристики. Завдяки своїй мобільності та універсальності, БПЛА можна використовувати як платформи повітряного зв'язку, що дозволяє підтримувати зв'язок у важкодоступних чи аварійних регіонах.

Платформи повітряного зв'язку на базі БПЛА можуть надавати додаткову пропускну здатність та покриття, особливо в зі значним навантаженням на мережу. Вони можуть бути використані для підтримки масових заходів, спортивних подій, концертів та інших подій, де зв'язок може бути перевантажений.

Крім того, БПЛА може допомогти у оновленні мережевих послуг після стихійних лихів або катастроф. Вони можуть бути використані для швидкого відновлення зв'язку в зоні надзвичайних ситуацій, де інфраструктура може бути пошкоджена.

# 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ БПЛА

## 1.1 Загальна характеристика БПЛА

Безпілотні літаючі апарати (БПЛА), також відомі як дрони, дійсно представляють собою важливий компонент сучасної авіаційної та технологічної сфер. Їх різноманітність і можливості забезпечують широке застосування в різних областях, починаючи від розвідки і комерційної фотозйомки до наукових досліджень та гуманітарних допомог.

Класифікація та характеристики БПЛА дійсно можуть значно варіюватися в залежності від їхнього призначення, технічних характеристик, функціональності та рівня автономності. Різні типи дронів можуть бути використані для різних завдань:

- Мультироторнідрони (Quadcopters). Ці дрони мають чотири ротори і використовуються для аерофотозйомки, відеозйомки, досліджень важкодоступних місць, а також для розваг.

- Фіксованокрильнідрони (Fixed-WingDrones). Ці дрони мають фіксовані крила, як у літаків, і зазвичай використовуються для великих відстаней, аерофотозйомки великих територій, картографування та досліджень.

- Вертикально-злітні та посадкові дрони (VTOL). Ці дрони можуть взлітати та сідати вертикально, але літати горизонтально, що робить їх ефективними для деяких специфічних завдань.

- Гібридні дрони. Комбінують риси мультироторних і фіксованокрильнихдронів для поєднання переваг обох типів.

- Професійні дрони. Зазвичай мають вищі технічні характеристики, велику вагу покладається на якість зображення, акумуляторну продуктивність та довготривалість польотів.

- Розвідувальні та військові дрони. Використовуються для здійснення розвідки, нагляду, збору інформації в умовах військових конфліктів або надзвичайних ситуацій.

- Дрони для доставки. Застосовуються в логістиці для швидкої та ефективної доставки товарів.

- Дрони для досліджень і моніторингу. Використовуються для наукових досліджень, моніторингу клімату, стану навколишнього середовища тощо.

БПЛА мають складну конструкцію, що включає різноманітні компоненти та модулі для забезпечення їхньої роботи та виконання завдань відповідно до призначення. Ось деякі з ключових компонентів та їхніх функцій:

- Супутниковий навігатор. Цей модуль забезпечує точний позиціонування та навігацію БПЛА за допомогою сигналів від супутників, таких як GPS. Це важливо для визначення місця знаходження, трекінгу та планування маршрутів.

- Програмований модуль (FlightController). Це комп'ютерний модуль, що відповідає за управління всіма аспектами польоту, включаючи стабільність, керування, старт та посадку. Він приймає команди від оператора або автоматичних систем і керує рухами БПЛА.

- Карта пам'яті. Використовується для збереження записаних даних, таких як фотографії, відео або інші дані, які можуть бути згодом використані або передані.

- Передавач (Transmitter). Встановлюється, якщо БПЛА потрібно керувати в реальному часі з пульта оператора. Передавач відправляє сигнали та команди до приймача БПЛА.

- Приймач команд (Receiver). Використовується для прийому команд від оператора, якщо БПЛА може реагувати на вказівки в реальному часі.

- Датчики. БПЛА може бути обладнаний різними датчиками, такими як гіроскопи, акселерометри, барометри та інші, для вимірювання параметрів польоту та навколишнього середовища.

- Камера та інші датчики. Деякі БПЛА можуть мати вбудовані камери або інші датчики, такі як термальні камери, для виконання спеціалізованих завдань, таких як фотозйомка, відеозйомка, дослідження тощо.

- Акумуляторна батарея. Забезпечує енергію для роботи БПЛА. Тип і ємність батареї може впливати на тривалість польоту.

–Автопілот. Деякі дрони можуть мати систему автопілота, яка дозволяє їм автоматично виконувати певні завдання без втручання оператора.

– Керована навігація. Деякі дрони можуть мати спеціалізовані додаткові модулі для керованої навігації, яка дозволяє їм виконувати точні рухи та маневри.

Ці компоненти і функції можуть бути комбіновані та змінюватися залежно від призначення конкретного безпілотно апарата.

## 1.2 БПЛА з фіксованим крилом

Однією з переваг цього типу БПЛА з нерухомим крилом є його стабільність та висока ефективність завдяки використанню жорсткого крила, що створює підйомну силу. Це дозволяє забезпечити глайдероподібні характеристики та знизити ризик помилок пілотування або технічних несправностей. Крім того, цей тип БПЛА може нести більше обладнання на великі відстані при менших витратах енергії рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – БПЛА з фіксованим крилом

Із урахуванням усіх зазначених можливостей, цей тип БПЛА ідеально підходить для доставки невеликих вантажів або для виконання тривалих місій. Проте, варто відзначити, що для завдань, де потрібна висока точність, доцільно розглянути інші типи дронів. Бо, незважаючи на переваги, які забезпечує фіксоване крило, БПЛА з нерухомим крилом не можуть стійко утримуватися над однією точкою, а значить, не можуть забезпечити потрібної точної позиції камери

для завдань, де вимагається висока прецизія. Такі завдання можуть включати, наприклад, відеоспостереження, картографування або точну агрофізичну оцінку. Тому для таких сценаріїв рекомендується використання інших типів дронів здатних забезпечити необхідну стабільність та точність позиціонування.

### 1.3 БПЛА з гвинтовим крилом

Дрон із вертикальним зльотом та посадкою (див. Рис. 1.2) – це безпілотний літальний апарат, який основний час свого польоту проводить завдяки підйомній силі, що створюється гвинтами. Основна перевага такого типу дронів полягає в їх здатності вертикально злітати і сідати, що дозволяє використовувати їх в обмежених просторах. Завдяки цій можливості, такі БПЛА можуть виконувати високоточні місії, такі як інспекція залізниць, трубопроводів, електромереж, мостів і т. д. Проте важливо враховувати, що гвинтокрилі БПЛА вимагають більшого обслуговування з точки зору технічного обслуговування та ремонту.

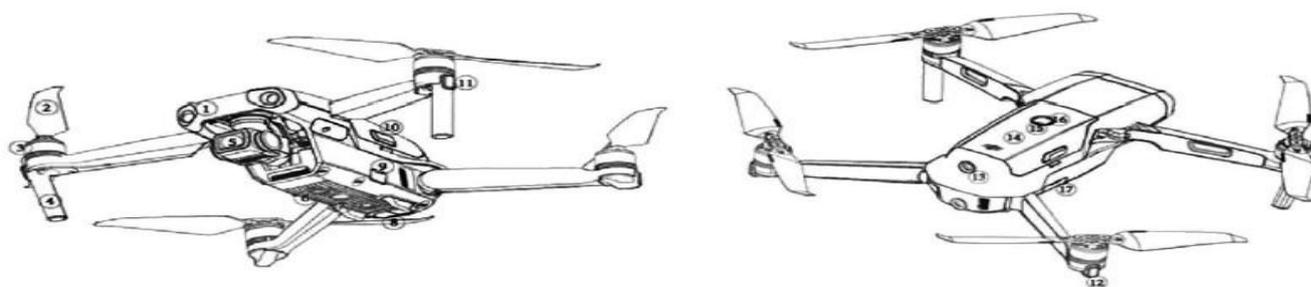


Рисунок 1.2 – Гвинтокрилий БПЛА

Аналізуючи світові тенденції, можна виявити кілька можливостей розширення телекомунікаційних мереж стільникових операторів з використанням дронів:

– Використання дронів для прив'язки. Ця стратегія передбачає використання дронів, які знаходяться в нерухомому положенні у повітрі, щоб покращити сигнал і забезпечити покриття мережі в місцях з поганим зв'язком.

– Використання дронів для ретрансляції послуг. Дрони можуть бути використані для передачі сигналу у важкодоступних або віддалених місцях, де немає покриття стільникових мереж.

– Розгортання послуг зв'язку з використанням атмосферних супутників. Ця стратегія включає в себе створення угруповань атмосферних супутників, які забезпечують доступ до телекомунікаційних послуг у віддалених або недоступних звичайним чином місцях.

В основу надання телекомунікаційних послуг на базі дронів можуть бути мініатюрні мобільні базові станції стандарту LTE (5G), які забезпечують стільниковий зв'язок та доступ до Інтернету у місцях з обмеженим або низьким покриттям мережі, а також в віддалених районах та на спеціальних заходах.

#### **1.4 Дрон на прив'язі**

Компанія НВП "Спайтек" з Одеси представила і успішно впровадила нове доповнення до свого передового безпілотного літального апарату (БПЛА) "Windhower". Це інноваційна система "Winder" для бездротового живлення, яка призначена для забезпечення тривалого утримання дрона на стаціонарній позиції на висоті до 110 метрів.

Багато з недавніх змін у розвитку безпілотних комплексів визначаються зростанням потреб у військовій сфері та проведенні спеціальних операцій. Деякі з нововведень впливають із актуальних військових тенденцій, породжених успішним використанням певних технологій у світових конфліктах. Інші ж реалізуються через впровадження першим в світі конкретного прориву. Плин часу дає можливість просіяти та визначити, які технології дійсно важливі для щоденного використання військовими та спецслужбами.

Однією з технологій, яка може суттєво підвищити ефективність використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) типу коптера, є використання наземних станцій живлення, відомих як базові станції. Це дозволяє

дронам залишатися в повітрі протягом тривалого часу, не обмежуючи їхні можливості виконання місій.

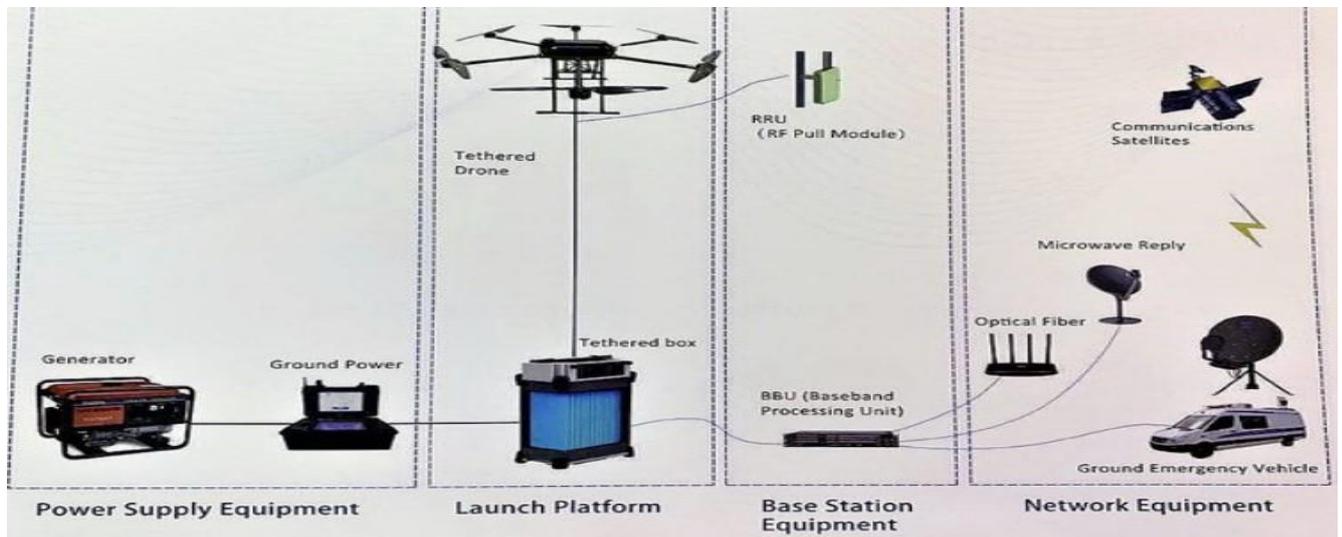


Рисунок 1.3 – Приклад організації роботи базової станції

Така зв'язка може бути використана як пункт спостереження для контролю наземної обстановки. Безпілотники, оснащені відповідними сенсорами, можуть забезпечити широкий огляд як вдень, так і вночі. При потребі такий пункт спостереження може бути оперативно розгорнутий на необхідному напрямку або швидко переміщений на інший, відмінно від стаціонарних рішень, таких як спостережні вежі чи мачти.

Крім того, кабель може служити не лише для живлення, а й для передачі сигналів управління та даних. Це надає новий рівень конфіденційності у використанні умовах, коли є ризики виявлення роботи пункту спостереження, а також захист від різних видів впливів, включаючи радіоелектронну боротьбу противника.

Використання зв'язки між "Windhower" + "Winder" має значні переваги у відношенні до традиційних методів, оскільки воно є вартісним ефективним рішенням для виконання завдань як у цивільній, так і в військовій сферах. Це надає можливість швидко та ефективно зміцнити стабільність України та забезпечити безпеку її громадян за доступну ціну.

## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У РАДІОМЕРЕЖАХ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ**

### **2.1 Розгляд концепції інтегрованої мережі, що об'єднує космічні, повітряні та земельні системи з використанням БПЛА**

Для ефективного впровадження різноманітних послуг IoT з різними вимогами до якості обслуговування (QoS) у різних сценаріях (наприклад, міські, сільські та рідкомешкані райони), потрібно використовувати переваги кожної типової мережевої парадигми. Наприклад, щільно розгорнуті наземні мережі в міських областях можуть забезпечувати високу швидкість передачі даних, тоді як системи супутникового зв'язку можуть забезпечити широке охоплення й безперебійний зв'язок з віддаленими та рідкомешкані районами. Зв'язок з БПЛА може стати додатковим рішенням для оптимізації роботи існуючих стільникових мереж та надання рентабельних послуг у місцях з високою густотою населення. Виникає потреба в розробці інтегрованої мережевої архітектури, що об'єднує космічну, повітряну та наземну інфраструктури, для ефективної обробки великих обсягів даних та виконання різноманітних додатків, таких як Інтернет речей, хмарні обчислення та аналітика великих даних.

Представлена загальна архітектура інтегрованої мережі космос-повітря-земля (CPG) на рис. 2.1, призначена для забезпечення користувачів пристроями з покращеними і гнучкими послугами, які можуть бути розділені на три сегменти: космічний, повітряний та земельний. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) використовуються для створення багаторівневої мережі БПЛА та інфраструктури радіодоступу, мобільних користувачів і транспортних засобів, що складають земельну мережу. Крім того, програмно визначені мережеві контролери (SDN) розгортаються для регулювання поведінки мережі та управління мережевими ресурсами з метою полегшення взаємодії між космосом, повітрям і землею. Зважаючи на різні сегменти з відмінними характеристиками, такими як стандарти зв'язку та різні мережеві пристрої з різними функціями, інтерфейси управління і



сусідніми супутниками та наземними мережами. Космічна мережа може забезпечити глобальне покриття послугами аварійного рятування, навігації, спостереження Землі та зв'язку / ретрансляції. Для надання послуг з мінімальною затримкою та великою пропускну здатністю, таких як діапазон С і діапазон Ка, використовується більш висока смуга частот.

Взаємодія між супутниками та безпілотними літальними апаратами (БПЛА) є ключовим компонентом інтегрованої мережі космос-повітря-земля. На відміну від зв'язку на землі, канал супутник-БПЛА переважно ґрунтується на лінії прямої видимості і стає вразливим до затримок під час дощу при використанні високочастотного діапазону Ка і вище. БПЛА може здійснювати зв'язок з супутниками на різних орбітах під час свого польоту завдяки своїм додаткам та обладнанню. Зазвичай для цього використовується геосинхронний супутник, оскільки його положення відносно Землі залишається сталим.

Для встановлення успішного зв'язку між безпілотним літальним апаратом (БПЛА) та супутником вирівнювання просторового променя від БПЛА на цільовий супутник є ключовою передумовою. Однак постійна зміна орієнтації під час безперервної навігації БПЛА призводить до постійної зміни напрямку променя, що впливає на стабільність зв'язку. Один із типових сценаріїв - це супутниковий зв'язок через БПЛА, що потребує постійного коригування просторового променя для підтримки лінії зв'язку з цільовим супутником.

В мережі повітряного базування широкий асортимент безпілотних літаючих платформ, включаючи БПЛА, дирижаблі та повітряні кулі, може бути обмежений різними робочими висотами через фактори обміну об'ємом, вагою та споживанням енергії. БПЛА зазвичай оснащуються приймачами-передавачами для забезпечення гнучкого доступу в Інтернет для групи наземних користувачів, які перебувають в межах зони покриття. Розмір зони покриття дрона в значній мірі залежить від висоти, місцезнаходження, потужності передачі та умов довкілля. Крім того, рій БПЛА співпрацює, створюючи канали зв'язку між БПЛА для спільного надання послуг. Багаторівнева мережа БПЛА не лише забезпечує обмін керуючими повідомленнями між БПЛА для запобігання зіткнень та

розрахунків траєкторій польоту, але й передає дані на мобільні пристрої, які взаємодіють з ними. Конкретні БПЛА оснащені різноманітними радіоінтерфейсами, такими як LTE або WiFi, для зв'язку з інфраструктурою або супутниками, що встановлюють шлюзи між багаторівневими мережами БПЛА та іншими мережами. БПЛА може використовувати повітряну лінію зв'язку з супутниками або підключатися до наземної системи через транзитну лінію зв'язку.

У наземній мережі, що включає макростанції та малі соти, обслуговуються різноманітні мобільні користувачі, такі як мобільні телефони, безпілотні автомобілі, пристрої IoT тощо. Це створює сприятливу основу для розвитку проривних технологій у бездротових мережах 5G. Вона охоплює всі перспективні стільникові технології 5G, включаючи використання міліметрового діапазону частот, збір енергії, передачу NOMA і зв'язок D2D, що стало актуальною темою досліджень.

Також, за рахунок стрімкого зростання обчислювальних можливостей мобільних пристроїв, вирішується питання мобільних периферійних обчислень (MEC), де безпілотні літальні апарати можуть виконувати обчислювальні завдання. Крім цього, популярний контент може бути кешований на БПЛА або на наземних пристроях і передаватися за допомогою дронів або через безпосередній зв'язок між кінцевими пристроями.

У той же час, інтеграція повітряної мережі і наземної мережі передбачає два типи каналів передачі даних: канали передачі даних LoS та канали супутникової передачі даних. Канали передачі даних LoS використовуються для прямої передачі від БПЛА до наземної станції управління (GCS), проте цей метод може мати обмеження в областях з великою кількістю перешкод, що не підходять для військових застосувань.

У даній роботі була представлена загальна архітектура інтегрованої мережі B5G, яка враховує взаємозв'язок між різними розвиваються технологіями. У цю архітектуру включено концепції діапазону частот mmWave, збирання енергії, передачу NOMA і зв'язок D2D, що є ключовими для майбутнього розвитку мереж

5G. Додатково, розглянуті ролі МЕС і кешування в цій архітектурі, що сприяє покращенню продуктивності і ефективності мережі.

Незважаючи на зростаючу важливість інтегрованої мережі космос-повітря-земля у бездротовому зв'язку 5G, розробка такої мережі є складною задачею, оскільки вона включає в себе моделювання каналу повітря-земля, оптимальне розгортання, енергоефективність, управління ресурсами, забезпечення безпеки мережі і багато іншого.

Моделювання каналів повітря-земля є складним завданням через різницю характеристик каналу повітряного сегменту та його варіабельність у часі і просторі. Крім того, такі канали більш схильні до блокування порівняно з каналами "повітря-повітря". Тому потрібні вдосконалені моделі для опису каналів повітря-земля, які враховують різноманітність середовища та інші фактори. Безліч кампаній по вимірюванню каналів та спроб моделювання були проведені для оцінки їх характеристик в різних умовах.

У цьому дослідженні досліджено виклики, пов'язані з розгортанням інтегрованої мережі космос-повітря-земля, зокрема зв'язку між БПЛА та супутниками. Мобільність БПЛА та супутників ускладнює роботу мережі. Необхідно враховувати характеристики каналів "повітря-земля" для оптимального розгортання БПЛА та запобігання фізичним зіткненням. Однак супутникова система має обмежену потужність і смугу пропускання, що ускладнює її використання, особливо на високих частотах.

Планування маршруту для рою БПЛА є складною задачею через необхідність забезпечення зв'язку з наземними користувачами і сусідніми БПЛА. Пошук оптимальної траєкторії враховує практичні обмеження та вимагає динамічного управління траєкторією.

Обмежена кількість енергії, доступна на БПЛА, обмежує їх тривалість польоту і час роботи. Важливо розвивати передові технології зарядки для забезпечення тривалої роботи БПЛА.

Мережева безпека є важливим аспектом, оскільки інтегровані мережі вразливі до зловмисних атак. Забезпечення захисту мережі та виявлення несанкціонованого доступу є критично важливими завданнями.

Попит на реальний час вимагає максимальної швидкості збору та обміну даними в умовах високих частот помилок та затримок передачі. Оптимізація каналів передачі даних та розвиток передових технологій обробки даних в реальному часі є ключовими аспектами цього завдання.

На сьогоднішній день велика увага приділяється дослідженням мереж зв'язку з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо в контексті тимчасових або допоміжних зв'язків. Завдяки портативним приймачам і передовим технологіям обробки сигналів успішний зв'язок з БПЛА дозволяє забезпечити широке покриття і підтримувати масштабні динамічні з'єднання. На рис. 2.2 показаний сценарій, в якому БПЛА виступають у ролі літаючих базових станцій. Зазвичай ці БПЛА мають різноманітні корисні навантаження для прийому, обробки і передачі сигналів, що доповнюють існуючі стільникові системи і забезпечують додаткову пропускну здатність в умовах великої концентрації користувачів під час військових дій. Цей сценарій розглядається як один з ключових напрямів розвитку майбутніх стільникових мереж.

Крім того, БПЛА можуть бути використані для підтримки інфраструктури зв'язку в надзвичайних ситуаціях та в умовах громадської безпеки, коли існуюча наземна мережа пошкоджена або неспроможна працювати повністю.

Для оптимізації продуктивності систем зв'язку БПЛА в мережах 5G велике значення мають методи на фізичному рівні, оскільки вони суттєво впливають на функціонування БПЛА. На фізичному рівні існують п'ять ключових технологій-кандидатів, таких як зв'язок у міліметровому діапазоні, передача NOMA, CR і збір енергії.

Необхідно відзначити, що безпілотні літаючі апарати можуть зіткнутися з різними типами даних, такими як голос, відео і великі файли, що створює надзвичайні виклики з точки зору вимог до високої пропускну здатності. Цей очікуваний ріст поряд з наростанням спектру стимулює перехід на нові

розподілені частоти. У цьому контексті використання зв'язку в міліметровому діапазоні стає перспективним рішенням, оскільки він може використовувати переваги широкого спектру неліцензованих частотних ресурсів у діапазоні міліметрових хвиль (понад 30-300 ГГц), щоб відповісти на високі вимоги бездротових мереж 5G.

Забезпечення бездротового мобільного доступу для стільникових мереж за допомогою БПЛА в діапазоні міліметрових хвиль стикається з викликом високих втрат при поширенні, що випливають з Закону Фрїїса, який стверджує, що втрати на всеспрямованому тракті у вільному просторі зростають пропорційно квадрату несучої частоти. Однак коротка довжина хвилі сигналів міліметрового діапазону дозволяє розмістити кілька антен на невеликому БПЛА. Це використовується для створення вузькоспрямованих променів з використанням методів формування променя, щоб подолати високі втрати на трасі та поглинання сигналів атмосферою. Однак основна відмінність мережі з використанням БПЛА в міліметровому діапазоні полягає в тому, що БПЛА може переміщатися. Це ускладнює розв'язання ряду проблем, таких як ефективне вивчення та відстеження формування променя та управління каналом передачі даних для компенсації ефекту Доплера, який виникає внаслідок руху БПЛА.

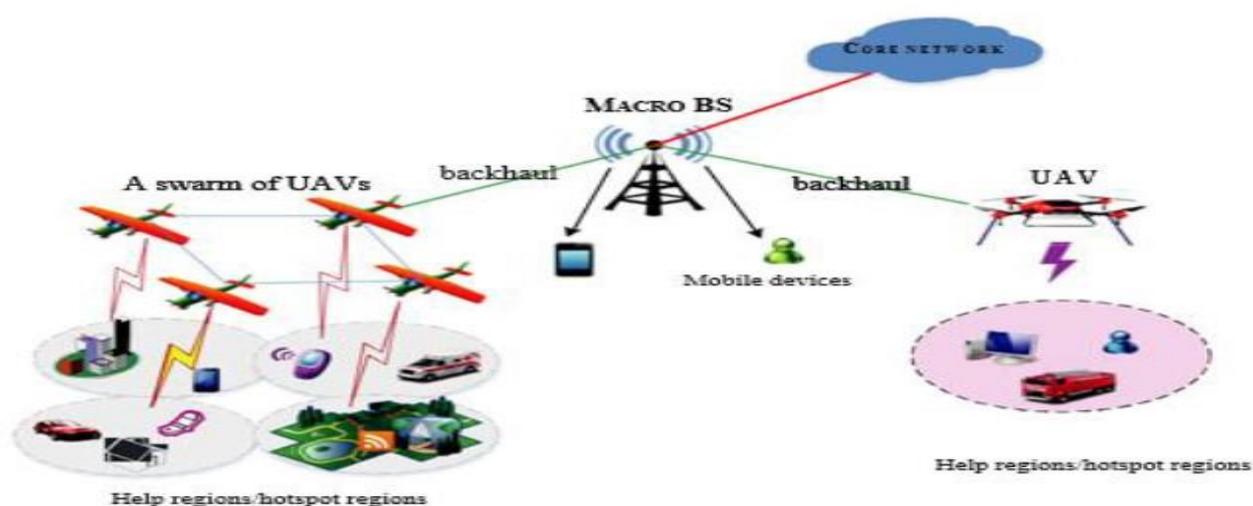


Рисунок 2.2 – Сценарій використання БПЛА як повітряні базові станції для забезпечення зв'язку в певній області, комунікуючи з наземними користувачами та іншими БПЛА

Було проведено дослідження використання БПЛА як повітряних базових станцій для забезпечення зв'язку в певній області. Досліджено різні аспекти такої системи, включаючи структуру ієрархічної кодової книги для формування діаграми спрямованості, використання множинного доступу з просторовим розділенням для підвищення пропускну здатності, секретність мережі зв'язку з підтримкою БПЛА, ефективний метод ретрансляції для зв'язку в міліметровому діапазоні та відстеження каналу для системи зв'язку MIMO БПЛА. Також розроблено багатодіапазонний HetNet з використанням БПЛА та оцінено ефективність використання методу ущільнення малих осередків для усунення обмежень поширення.

## **2.2 Використання передачі NOMA для безпілотних літальних апаратів**

Останнім часом передача NOMA набула великої популярності як ключова технологія для систем зв'язку 5G. Ця технологія дозволяє досягти високої спектральної ефективності за рахунок використання суперпозиційного кодування в передавачах та послідовного придушення перешкод (SIC) в приймачах. У порівнянні з традиційними схемами множинного доступу (OMA), NOMA може обслуговувати безліч користувачів з різноманітними шаблонами трафіку неортогональним чином, що забезпечує ефективне використання спектру. Це створює ефективний механізм для забезпечення потреб масових наземних користувачів на різних рівнях потужності. Реалізація NOMA базується на використанні відмінностей у каналах зв'язку між користувачами. Недавні дослідження показали можливість успішного впровадження передачі NOMA для зв'язку за допомогою безпілотних літальних апаратів, де такі апарати можуть обслуговувати одночасно декількох користувачів на одній несучій частоті, особливо у сферах екстрених служб з великою кількістю користувачів.

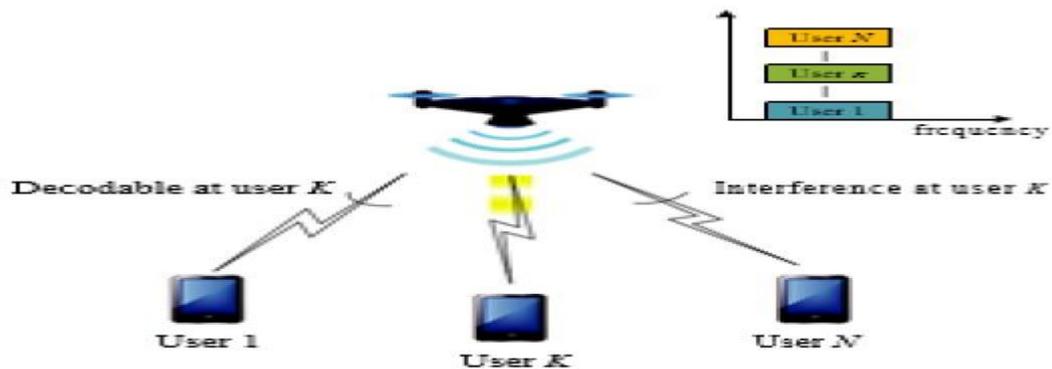


Рисунок 2.3 – Схема для використання NOMA з БПЛА

БПЛА надає обслуговування декільком наземним користувачам, де сигнали користувачів від 1-го до  $k$  приглушаються для  $k$ -го користувача, тоді як сигнали від користувачів з  $k + 1$  по  $N$  розглядаються як перешкоди.

Дослідження, які проводилися для випадку NOMA [1], з двома користувачами, спрямовані на виявлення оптимальної висоти вертольотного БПЛА-БП з метою забезпечення рівної можливості для всіх користувачів при обмеженні їхньої швидкості. Ці дослідження продемонстрували переваги NOMA порівняно з OMA. У подальших роботах була розглянута методологія оптимізації висоти БПЛА [2], для розширення зони покриття з урахуванням обмежень. Використовуючи БПЛА з нерухомим крилом, вдалося обслуговувати двох наземних користувачів через передачу NOMA по низхідній лінії зв'язку. Результатом було встановлення оптимального режиму передачі для максимізації справедливості серед користувачів. Крім того, передача NOMA використовувалася і в системах ретрансляції за допомогою БПЛА [2].

Останні дослідження зосереджені на впровадженні передачі NOMA на БПЛА-БС на міліметровому діапазоні частот для обслуговування кількох користувачів одночасно в одному промені. Це дозволило визначити оптимальну робочу висоту та розподіл потужності з метою підвищення ефективності сумарної швидкості та зменшення відмов. Щоб зменшити обсяг передачі даних, пов'язаний із великим обсягом інформації про стан каналу, були розглянуті обмежені схеми зворотного зв'язку, зокрема на основі інформації про відстань та кут користувача.

Запропонована схема зворотного зв'язку на основі кута виявилася більш ефективною у порівнянні зі схемою на основі відстані.

Для вирішення завдання максимізації сумарної швидкості була розроблена методологія, що використовує БПЛА з однією антеною для обслуговування багатьох наземних користувачів. Це включало спільну оптимізацію декількох параметрів, таких як висота польоту, ширина променя антени передачі, потужність та пропускна здатність. Для вирішення цього завдання був розроблений відповідний алгоритм.

Одним із просунутих напрямків є використання структури БПЛА з підтримкою MIMO-NOMA, де кожен БПЛА взаємодіє з безліччю користувачів, обладнаних безліччю антен. Такий підхід виявився досить перспективним, і використовувався для моделювання розташування користувачів NOMA в мережі БПЛА з підтримкою NOMA.

Недавні дослідження також виявили, що структура БПЛА з підтримкою MIMO-NOMA може бути ефективно використана для оптимізації швидкості в системах ретрансляції та для забезпечення стійкості до змін умов каналу.

Використання NOMA для зв'язку з БПЛА є перспективним, але воно супроводжується рядом проблем та обмежень. Ось деякі з них:

- Технологія SIC, використовувана на стороні приймача для розмежування сигналів, є складною і вимагає точної оцінки інформації про стан каналу як на приймачах, так і на передавачах. Це може бути важким завданням в мережах зв'язку БПЛА.

- NOMA мультиплексує кілька користувачів в одній області потужності, що може призводити до міжрівневих перешкод, що потребують додаткових зусиль для їх подолання.

- З мобільністю БПЛА відстань до наземних користувачів постійно змінюється, що впливає на порядок декодування SIC. Це може призводити до змін у рівнях сигналів різних користувачів та порядку декодування, що потребує адаптації в реальному часі.

## 2.3 Мережі когнітивних БПЛА

У теперішній час однією з серйозних проблем, що постає перед бездротовими мережами з використанням БПЛА, є дефіцит радіочастотного спектру. Це обумовлено кількома факторами:

Зростання популярності та використання портативних мобільних пристроїв на землі, таких як смартфони і планшети, що призводить до збільшення навантаження на радіочастотний спектр.

Одночасна експлуатація різних бездротових мереж (Bluetooth, WiFi, LTE та стільникові мережі) в межах робочого спектру БПЛА. Це призводить до жорсткої конкуренції за використання радіочастотного спектру, що ускладнює зв'язок з БПЛА і створює проблему дефіциту спектру.

Для забезпечення зв'язку БПЛА потрібно мати можливість отримати додатковий доступ до радіочастотного спектру шляхом динамічного використання наявних частотних смуг.

До цього часу багато дослідників та стандартизаційні групи впроваджували концепцію об'єднання систем зв'язку на основі когнітивного радіо та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для розширення можливостей використання спектру, відому як когнітивне з'єднання БПЛА. Ця концепція є потужною архітектурою мережі, яка дозволяє безпілотним літальним апаратам існувати поруч з наземними мобільними пристроями, працюючи в одних і тих же частотних діапазонах. У таких випадках зв'язок між БПЛА та землею може створювати серйозні перешкоди для існуючих наземних пристроїв, оскільки БПЛА, як правило, має потужні лінії прямого зв'язку з наземними користувачами.

Наприклад, у дослідженні [14] була оптимізована траєкторія руху безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та розподіл потужності передачі з метою досягнення максимальної пропускну здатності когнітивного зв'язку БПЛА, при цьому обмежуючи перешкоди для первинних приймачів на приймальному кінці до допустимого рівня. В іншому дослідженні [15] був розглянутий базовий метод розподілу спектру між мережею безпілотних літальних апаратів та традиційною

наземною мережею в різних сценаріях, включаючи спільне використання спектру обома мережами. Використовуючи теорію стохастичної геометрії, були отримані явні вирази для ймовірності покриття області дронами та досягнута оптимальна щільність розташування БПЛА-базових станцій для максимізації пропускної здатності. Аналогічно, у роботі Sboui et al. [16] було запропоновано інтегрувати когнітивне радіо в систему БПЛА, де БПЛА, як вторинний передавач, випадково використовував доступний спектр та спільно використовував його для передачі даних на землю. Головною метою було максимізувати енергоефективність БПЛА для забезпечення ефективної та довгострокової роботи.

## **2.4 Системи БПЛА з орієнтацією на енергоефективність**

У контексті БПЛА, які живляться від обмеженої батареї, доступність енергії для забезпечення зв'язку виявляється проблемою через обмежений час роботи, який зазвичай не перевищує 30 хвилин. Такий обмежений запас енергії обмежує можливість БПЛА довго залишатися в повітрі без необхідності повертатися на зарядку. Тому, забезпечення стабільних та надійних послуг зв'язку стає складною задачею і може стати слабким місцем у продуктивності цих систем.

Враховуючи значення продовження терміну служби мережі БПЛА, енергоефективність є критичним аспектом для багатьох їх додатків. Останні дослідження в цій області зосереджені на механізмах, які допомагають зменшити енергоспоживання БПЛА. Наприклад, у певних дослідженнях розглянута ефективна схема планування передачі БПЛА в кооперативній ретрансляційній мережі, що дозволяє мінімізувати споживання енергії, використовуючи субоптимальні рішення та забезпечуючи економію енергії до 50%. Також досліджено енергоефективне розгортання кількох БПЛА-БС для мінімізації загальної потужності передачі відповідно до вимог швидкості наземного зв'язку, використовуючи теорію оптимального перенесення.

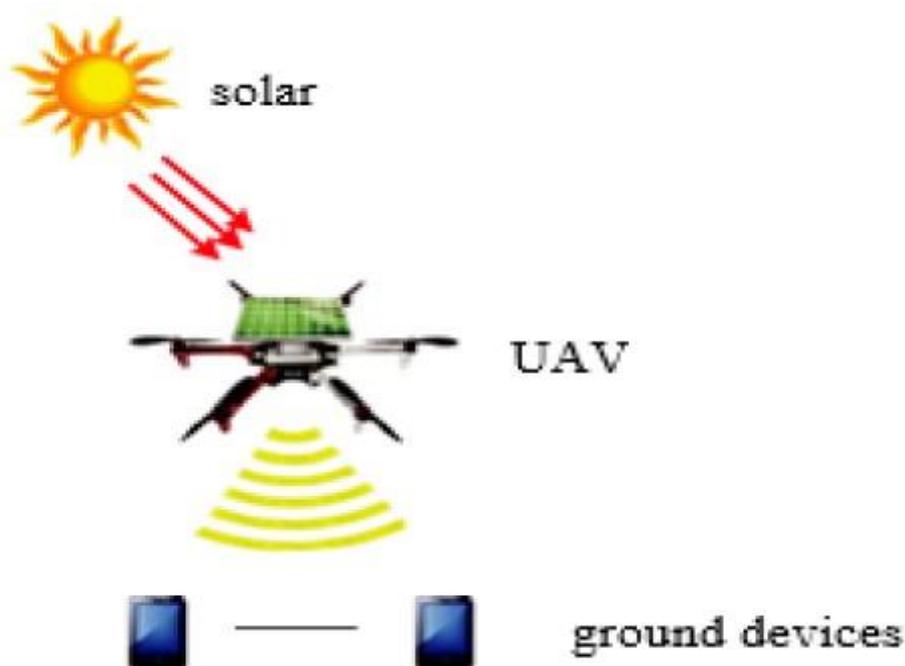


Рисунок 2.4 – Система зв'язку на основі сонячної енергії для безпілотних літальних апаратів

Наприклад, деякі дослідження вивчають оптимізацію траєкторії безпілотного літального апарату (БПЛА) з фіксованою висотою з урахуванням споживання енергії та побудовано відповідну теоретичну модель. Інші дослідження розробляють енергоефективне завдання оптимізації зв'язку БПЛА за допомогою технології когнітивного радіо з метою мінімізації загального енергоспоживання, включаючи польот і зв'язок. Також проводиться дослідження енергоспоживання БПЛА під час руху та підключення до мережі з урахуванням рівноцінного покриття зв'язку. БПЛА з сонячним живленням є привабливою альтернативою для подовження тривалості їх польоту, оскільки вони можуть збирати енергію з сонячного випромінювання. Ці дослідження вказують на значний потенціал сонячних енергетичних систем для використання в безпілотних літальних апаратах та підкреслюють важливість врахування погодних умов та технічних параметрів для оптимізації ефективності цих систем.

Деякі дослідження аналізують розвиток проектів щодо розподілу ресурсів для системи зв'язку БПЛА з декількома несучими на сонячній енергії. Мета полягає в максимізації сумарної пропускної спроможності системи, враховуючи

різні аспекти, такі як збір сонячної енергії, аеродинамічне споживання енергії, динаміка бортового накопичувача енергії та вимоги до якості обслуговування наземних користувачів. Також досліджується схема планування траєкторії БПЛА на сонячних батареях, що враховує стан перешкод і тіньові області, а також урахує непередбачуваність збору сонячної енергії через погодні умови.

Певні дослідження пропонують архітектуру енергонезалежного Інтернету БПЛА, що використовує станції підзарядки для підачі енергії на БПЛА за допомогою бездротової передачі енергії, що значно збільшує тривалість безперервної роботи. Також аналізуються характеристики збоїв в системах ретрансляції за допомогою БПЛА, коли енергія збирається з наземної базової станції, враховуючи різноманітні фактори, такі як затінення та рельєф місцевості.



Рисунок 2.5 – Зразок бездротової мережі, яку живить енергією з БПЛА

У контексті досліджень активно розглядається можливість використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для бездротового заряджання мобільних пристроїв. Оскільки БПЛА мають більшу потужність порівняно з мобільними пристроями, і вони можуть надавати послуги для заряджання пристроїв на землі, це відкриває можливості для ефективного бездротового заряджання великої

кількості пристроїв. Це сприяє покращенню безперервності життєвого циклу мобільних пристроїв і може збільшити продуктивність бездротового заряджання порівняно із традиційними стаціонарними зарядними станціями. Використання БПЛА для цієї мети стало активним напрямком досліджень.

Наприклад, в одному з досліджень була розглянута проблема поліпшення стійкості роботи датчиків на етапі зондування через радіочастотний сигнал від БПЛА. Для досягнення цієї мети був розроблений об'єднаний алгоритм оптимізації часу та потужності з метою максимізації середньої пропускної здатності. У цьому алгоритмі БПЛА виступає як статичне джерело енергії для кількох пар пристроїв, що спілкуються безпосередньо між собою, і застосовується протокол "збір-передача-збереження".

Деякі дослідження також розглядали питання мобільності БПЛА і використання їх у бездротових комунікаціях точка-точка (D2D) для збору енергії. У цьому контексті розроблено архітектуру енергонезалежної мережі БПЛА, що дозволяє передавати енергію на мобільні пристрої за допомогою бездротової передачі енергії (WPT) за допомогою радіочастотних сигналів. Такий підхід дозволяє значно збільшити час роботи мобільних пристроїв, покращуючи їхню продуктивність і стійкість.

Для подальшого розвитку досліджень в галузі бездротового зв'язку від БПЛА (W-PCN) використано мережу для максимізації мінімальної користувальницької пропускної здатності шляхом спільної оптимізації траєкторії БПЛА, управління потужністю висхідного каналу і розподілу часових ресурсів. В цьому дослідженні розглядалися обидва сценарії - інтегрований БПЛА і окремий БПЛА. Принципи WPCN були враховані для досягнення цієї мети.

У роботі була вирішена спільна задача оптимізації траєкторії БПЛА і розподілу ресурсів для максимізації пропускної здатності висхідної лінії зв'язку в налаштуванні WPCN з підтримкою БПЛА. При цьому враховувались обмеження максимальної швидкості БПЛА і обмеження енергонезалежності користувачів.

Майбутні мережі мають інтелектуально об'єднувати різні вузли, щоб створити багаторівневу ієрархічну архітектуру. Ця архітектура включатиме дрон-

стілники для покриття великих зон, малих стільників на землі для малих зон, а також комунікації пристроїв D2D та інші. Проте, інтеграція різних рівнів може викликати нові проблеми управління якістю обслуговування (QoS). Тому необхідні конкретні стратегії для координації QoS на різних рівнях мережі.

## **2.5 Використання БПЛА в гетерогенних мережах (HetNets)**

З введенням технології 5G у густих міських областях збільшується попит на широкопasmовий бездротовий зв'язок. Мережеві оператори змушені забезпечувати різноманітні послуги з високими швидкостями передачі даних, такі як потокове відео та мультимедійні потоки. Це призводить до значного збільшення обсягу мобільного трафіку і накладає додаткове навантаження на мережеві інфраструктури. Одним зі способів розвантаження стільникових мереж є використання малих комірок (наприклад, піко- і фемточарунки). Однак розгортання таких наземних інфраструктур може бути ускладненим, особливо у випадку несподіваних або тимчасових подій через складність та неоднорідність мобільних середовищ. Використання дронів-чарунків є одним із можливих рішень для підтримки наземних стільникових мереж у зоні змінного попиту. Ідея полягає в тому, щоб наблизити дронів-чарунків до користувачів, щоб поліпшити їх якість обслуговування за рахунок встановлення з'єднань Line-of-Sight (LoS) з неба.

Мобільність дронів дозволяє їм ефективно обслуговувати користувачів з високими вимогами до мобільності та швидкості передачі даних. Існують два основних напрямки досліджень: наземні та повітряні HetNets. У першому випадку, для поліпшення характеристик наземних мереж HetNets, було запропоновано використання плаваючих ретрансляційних чарунків на базі дронів для оптимізації обробки зростаючого обсягу трафіку внаслідок стрімкого розвитку мобільного Інтернету. Для цього дрони розташовувалися всередині невеликих приміщень.

У другому випадку, у дворівневій мережі HetNet з дронів, було розроблено оптимальне розгортання дронів, а метод координації перешкод, що

використовується в LTE-Advanced, використовувався для зменшення міжсіткових перешкод, що виникають внаслідок HetNet. Також було показано, що генетичний алгоритм є ефективним методом максимізації спектральної ефективності мережі. В іншому дослідженні досліджувалася проблема великомасштабних наслідків стихійного лиха для середовища, що складається з MBS і SBS, де дрони використовувалися для забезпечення покриття і безперебійного широкосмтового зв'язку в певних регіонах. Запропоновано генетичний алгоритм для оптимізації розташування дронів з метою максимізації пропускної здатності мережі.

Дослідження, проведене в [17], вирішувало проблему призначення БПЛА на основі запитів користувачів в HetNets. Була розроблена структура функції витрат на основі нейронних мереж для оптимізації розміщення користувацьких запитів та БПЛА з метою збільшення пропускної здатності мережі. Була розроблена структура функції витрат на основі нейронних мереж для оптимізації розміщення користувацьких запитів та БПЛА з метою збільшення пропускної здатності мережі. Розглядалася гетерогенна мережа, включаючи БПЛА як літаючі базові станції та наземні базові станції, що надавали бездротові послуги за запитом групи користувачів стільникового зв'язку. Була розроблена структура машинного навчання для прогнозування трафіку стільникових даних і сформульоване завдання мінімізації потужності для оптимізації розгортання БПЛА. Також, використовуючи концепцію ентропійних мереж і нейронних мереж, була розроблена схема мінімізації загальної мережевої затримки в HetNets за рахунок оптимізації розміщення та розподілу взаємодіючих БПЛА в областях попиту. Крім того, досліджувалося збалансування навантаження трафіку між UAV-BS і MBS для досягнення мінімального загального середнього коефіцієнта затримки між користувачами при обмеженнях енергії UAV-BS.

У рамках досліджень було вирішено задачу оптимізації розташування БПЛА-БП в HetNets у два етапи: спочатку визначення місця розташування, а потім оптимізація зони покриття зв'язку. Інші дослідження зосереджувалися на розгляді різних типів БПЛА, таких як висотні, середньовисотні, маловисотні та дальнього польоту, і їх поєднання в багаторівневій повітряній мережі.

Ці багаторівневі мережі HetNet залежать від щільності користувачів і послуг, і можуть містити різні типи БПЛА, аналогічно наземним HetNets з макро-, малими-, пікостанціями і ретрансляторами. Дослідницьке дослідження пропонувало концепцію повітряної мережі HetNet для розвантаження перевантажених наземних базових станцій у гарячих точках за допомогою рою невеликих БПЛА, що мають змінну робочу висоту. Досліджувалася також здійсненність багаторівневої мережевої архітектури БПЛА порівняно з традиційною однорівневою, з урахуванням спектральної ефективності передачі по низхідній лінії зв'язку та проблем, таких як енергоспоживання дронів та управління перешкодами. Вплив різних міських середовищ на архітектуру багаторівневої мережі БПЛА також досліджувався чисельними результатами.

## **2.6 Використання зв'язку D2D та БПЛА у спільній мережі**

Розвиток зв'язку D2D відкриває нові можливості для бездротових мереж, сприяючи розгрузці мобільних базових станцій шляхом безпосереднього зв'язку між сусідніми вузлами. Використання БПЛА у співпраці з D2D може значно розширити можливості мережі, вводячи нові рішення для забезпечення швидкого та ефективного бездротового зв'язку. Це відкриває перспективи для вдосконалення управління мережею і покращення її продуктивності, враховуючи мобільність БПЛА та динаміку зв'язку D2D. Різноманітні дослідження зосереджені на вирішенні важливих проблем, таких як управління перешкодами, оптимізація використання спектра та покращення загальної продуктивності мережі через спільне використання ресурсів БПЛА та D2D.

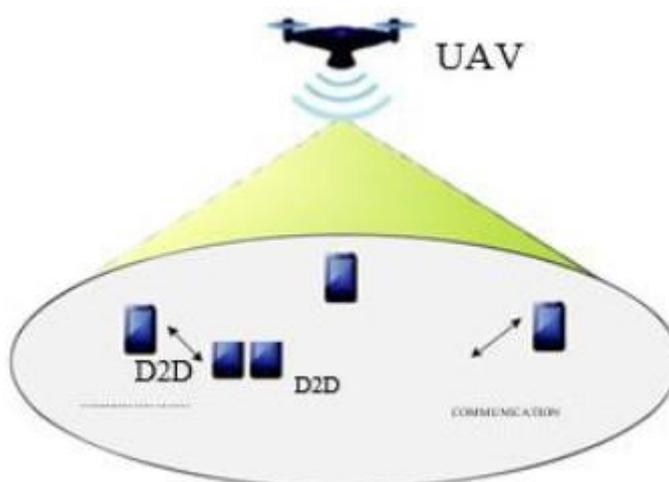


Рисунок 2.6 – Безпосередній зв'язок між пристроями D2D, впроваджений у мережі, яка опікується БПЛА

## 2.7 Мережі з програмно-визначеними функціями SDN для безпілотних літальних апаратів

Останні пропозиції щодо майбутніх архітектур бездротових мереж націлені на створення гнучких мереж з підвищеною маневреністю та стійкістю до відмов. Технологія програмованої мережі (SDN) була вперше запропонована в 2008 році для програмування мережі за допомогою логічно визначеного програмного забезпечення контролера. Цей контролер може розділяти площину управління і площину даних для полегшення реконфігурації мережі, що сприяє полегшенню управління інфраструктурою та ресурсами бездротових мереж. У порівнянні з традиційними мережами, SDN володіє кращою керованістю і прозорістю для мережевих компонентів, що дозволяє керувати мережею за допомогою централізованого контролера.

У реальних сценаріях використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у бездротових мережах необхідно ефективно налаштовувати мережі для безперешкодного включення та виключення БПЛА, зокрема для зміни протоколів та створення нових маршрутів. За використання архітектури програмованої мережі (SDN) безпілотні апарати можуть виконувати функції комутаторів SDN на

рівні даних для збору контекстної інформації розподілено, тоді як наземні базові станції виступають контролерами, які збирають дані і приймають рішення щодо управління мережевими функціями та розподілу ресурсів. За допомогою технології SDN можлива більш гнучка реконфігурація мережі та розподіл ресурсів між різними БПЛА.

У майбутній бездротовій мережі 5G передбачається інтеграція різних ресурсів для підтримки великого обсягу трафіку та різноманітних послуг. Це призведе до конвергенції можливостей зв'язку, обчислень і кешування. БПЛА, як важливий компонент Інтернету речей та майбутніх мереж 5G, може виконувати не лише роль платформи для прикордонних обчислень з метою надання гнучких і відмовостійких послуг для пристроїв Інтернету речей з обмеженими обчислювальними можливостями, але й служити додатковим методом кешування популярного контенту для зменшення робочого навантаження і затримок передачі в періоди пікового навантаження. Архітектура зв'язку, обчислень і кешування, орієнтована на БПЛА, показана на рис. 2.7.

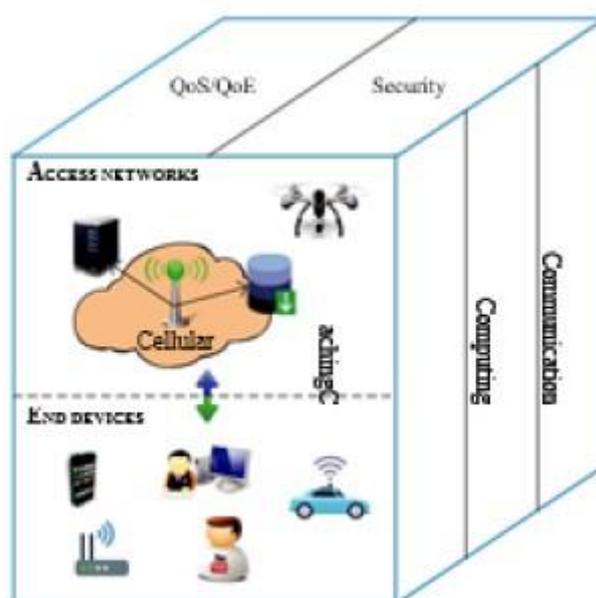


Рисунок 2.7 – Архітектура зв'язку, обчислень і кешування, зорієнтована на використанні БПЛА

## **2.8 Використання безпілотних літальних апаратів БПЛА у мережах обчислення на базі МЕС**

Завдяки обмеженій ємності батареї та обчислювальним обмеженням IoT-пристроїв, виконання додатків в реальному часі стає складною задачею. Останнім часом роль мережевих обчислень на краю (МЕС) стала вирішальною для подолання цих викликів. Завдяки розгортанню серверів МЕС мобільні користувачі можуть передавати свої обчислювальні завдання на межу мережі, розширюючи можливості хмарних обчислень. Це вирішує дві важливі проблеми:

- Зменшення затримок у виконанні додатків, особливо коли віддалений пристрій має значні обчислювальні ресурси.
- Підвищення продуктивності батареї, оскільки додаток виконується на віддаленому пристрої.

У мережах з підтримкою БПЛА, мобільні пристрої з обмеженими ресурсами можуть відправляти свої ресурсоємні завдання на літаючий БПЛА, який має високі обчислювальні можливості та може підключатися гнучко на кордоні мережі. Це дозволяє заощаджувати енергію та зменшувати навантаження трафіку на фіксованих хмарних серверах. Таким чином, БПЛА, обладнаний сервером МЕС, має численні переваги порівняно зі звичайною наземною мережею з фіксованими BS. Системна модель МЕС, встановленого на БПЛА, показана на рис. 2.8. У цьому випадку всі мобільні пристрої можуть вибирати між локальними обчисленнями або обчисленнями на кордоні мережі. У першому випадку мобільні пристрої виконують свої завдання локально за допомогою вбудованого мікропроцесора, використовуючи свої власні ресурси та споживаючи більше енергії. У другому випадку мобільні пристрої можуть передавати свої важкі обчислення безпосередньо на сервер МЕС, розташований в БПЛА, і сервер МЕС виконає їх обчислення від їх імені. Фактично, всі мобільні пристрої підключені до найближчого вузла БПЛА, який має достатньо енергії батареї та обчислювальних ресурсів.

Ідея встановлення процесора MEC на БПЛА була спочатку запропонована Jeong. Це дозволило мобільним пристроям розширити їхні обчислювальні можливості. У цьому дослідженні автори дослідили можливість мінімізації енергоспоживання мобільного пристрою шляхом оптимізації розподілу бітів для зв'язку по висхідній / низхідній лінії зв'язку в умовах задалегідь визначеної траєкторії БПЛА. Після цього було розроблено розширення для вирішення оптимізації розподілу бітів і траєкторії БПЛА для мінімізації споживання енергії мобільними пристроями з урахуванням затримки та обмежень енергетичного бюджету БПЛА, де розглядалися схеми OMA і NOMA відповідно.

Недостатня обчислювальна потужність бортового процесора в невеликих БПЛА може ускладнити виконання складних додатків. Це може бути подолано шляхом розвантаження обчислень на віддалені хмарні сервери або прикордонні сервери через MBS або SBS, що поліпшує ефективність батареї та продуктивність обчислень безпілотного літального апарату.

Такий вузол БПЛА може виконувати додаток за допомогою своїх власних ресурсів або відправляти обчислювальні завдання на прикордонний сервер або віддалену хмару для обробки з урахуванням вимог до якості обслуговування додатків.



Рисунок 2.8 – Система MEC, що інтегрована на БПЛА

## **2.9 Використання БПЛА для зберігання та швидкого доступу до кешованих даних**

З останніми роками спостерігається різкий приріст бездротового трафіку даних, що зумовлено розповсюдженням нових мобільних пристроїв та різноманітних мобільних додатків. Цей зріст трафіку переважно відбувається за рахунок популярного контенту, такого як стрімінгове відео та музика. Системи зв'язку, які базуються на станціях з низьким рівнем стійкості (SBS), хоч і забезпечують обслуговування великого обсягу трафіку, зазнають значного навантаження на транзитних каналах. Транспортні мережі нерідко не можуть впоратися з таким вибухом мобільного трафіку.

Щоб вирішити цю проблему, важливо розглядати інтелектуальне кешування популярного контенту на кордоні мережі. Це означає, що деякий популярний контент може бути збережений на пристроях, таких як безпілотні літаючі апарати, ретранслятори або пристрої D2D. Це дозволяє задовольняти потреби користувачів у популярному контенті без надмірної навантаження на зворотні канали передачі даних.

Одним із важливих аспектів мобільних мереж є гнучкість стратегій кешування, оскільки мобільні користувачі постійно переміщуються. Використання безпілотних літаючих апаратів БПЛА у ролі літаючих базових станцій може допомогти забезпечити динамічне кешування популярного контенту та ефективно обслуговування користувачів, враховуючи їхні моделі руху. Це сприяє не лише значному зниженню затримок передачі даних, але й зменшує навантаження на трафік у зворотному напрямку, особливо під час періодів пікового навантаження.

При використанні прикордонного кешування з використанням БПЛА можна безпосередньо кешувати вміст на літаючих базових станціях і потім розповсюджувати серед користувачів або кешувати в пристроях D2D, використовуючи планування маршрутів БПЛА. Ці стратегії дозволяють

підвищити якість обслуговування користувачів (QoE), зменшуючи при цьому необхідну пропускну здатність каналу зворотнього зв'язку.

Різні дослідження в області кешування на базі безпілотних літаючих апаратів (БПЛА) демонструють потенціал цього підходу для оптимізації мереж передачі даних. Наприклад, деякі дослідження розглядали можливість локального кешування популярного контенту на БПЛА у системах неліцензійного діапазону LTE. Це дозволяє БПЛА передавати цей контент безпосередньо користувачам на землі, алгоритм динамічного розподілу ресурсів на основі машинного навчання допомагає оптимізувати процес кешування і ресурси.

Хоча можливості поєднання безпілотних літаючих апаратів БПЛА з технологіями 5G є перспективними, дослідження у цій області все ще знаходяться на ранній стадії. Багато відкритих питань потребують подальшого вивчення та розробки перед тим, як можна буде повністю реалізувати потенціал цього поєднання.

### 3 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ТЕХНОЛОГІЄЮ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

#### 3.1 Опис системи, що імітує використання міліметрового діапазону

Сучасні комунікаційні системи можуть використовувати повітряні платформи, такі як коптери або безпілотні літальні апарати. Вчені досліджували можливість обслуговування безпілотних літальних апаратів за допомогою розгорнутих мереж LTE з антенами базових станцій, спрямованими на земне покриття.

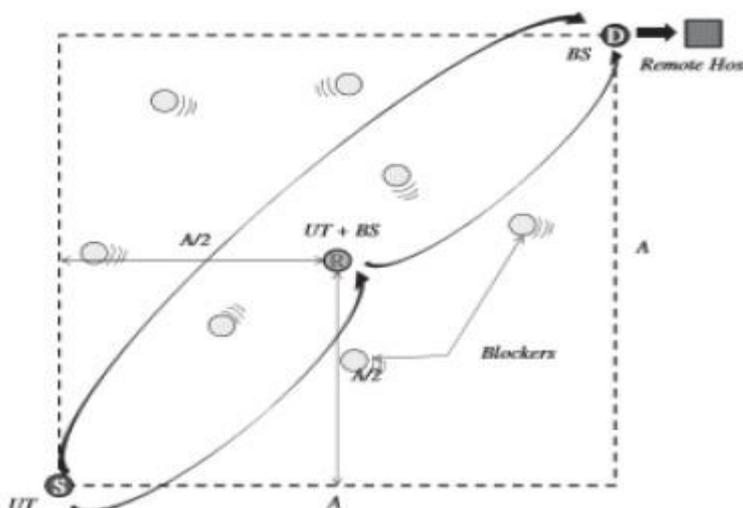


Рисунок 3.1 – Модельована система mmWave, показана з використанням перспективного БПЛА

Чорні стрілки відображають UDP-потіки від терміналу, призначеного для користувача (UT), до віддаленого хосту. Блокатори, розміром з людину, рухаються випадковим чином в межах квадрата зі стороною  $A$ .

Мобільна ретрансляція, спочатку впроваджена в системах LTE, стала важливою складовою для розвитку систем зв'язку 5G. У системах mmWave, що мають вищу вразливість до блокування, очікується більша пропускна здатність

порівняно з LTE. Це зумовлено більшою обсягом передаваних даних та можливістю розширення за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Вивчається сценарій використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як базових станцій для забезпечення покриття великого стадіону або концертного майданчика, де зосереджено тисячі мобільних користувачів. Нова структура передбачає використання інформації, спрямованої на користувача, такої як розподіл запитів на контент та шаблони мобільності, для оптимального розгортання БПЛА з можливістю кешування з метою максимізації якості взаємодії користувачів (QoE) за мінімальної загальної потужності передачі. Враховані випадкова висота дронів і мобільних терміналів, а також висока направленість каналів mmWave.

Аналізована система mmWave складається з мобільних терміналів (UT), базових станцій (BS) і безпілотних літальних апаратів в якості базових станцій (UAV-BS), як показано на рисунках 3.1 і 3.2. БПЛА з підтримкою mmWave виступає в якості єдиного об'єкта UT + BS. У роботі розглянутий діапазон частот 28 ГГц, що має численні переваги, такі як зручність у розгортанні антенних решіток і висока пропускну здатність. Практична довжина кроку визначається висотою установки антени (або висотою БПЛА), місцевістю і потужністю передавача. Умови прямої видимості (LOS) і відсутності прямої видимості (NLOS) важливі, за винятком дуже коротких ділянок. Розглядається можливість використання БПЛА для покращення показників якості обслуговування (QoS) при передачі в областях з великою концентрацією людей, де прямий шлях блокується перешкодами розміром з людину. БПЛА-BS розглядається як стаціонарна базова станція.

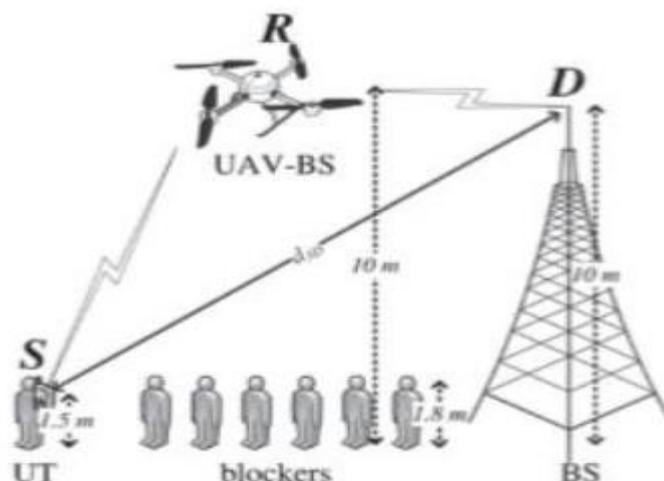


Рисунок 3.2 – Мобільний термінал користувача (UT), базова станція (BS) і  
безпілотний літальний апарат

Використання дронів для забезпечення зв'язку через mmWave відкриває безліч можливостей і викликів для протоколів на низькому та високому рівні, що відіграє важливу роль у розвитку ефективних комунікацій mmWave. Промені на частотах міліметрового діапазону будуть працювати між мобільними терміналами користувачів та безпілотними літальними апаратами в якості базових станцій, а також між безпілотними літальними апаратами та базовими станціями рис. 3.2. Очікується, що в кінцевому підсумку передача променів міліметрового діапазону буде більш ефективною за допомогою безпілотних літальних апаратів у ролі базових станцій.

Значний прогрес в аналітичному моделюванні технології mmWave відіграв важливу роль у просуванні моделювання системного рівня. Однією зі значних досягнень, досягнутих дослідниками, була реалізація мережі 5G, подібної до LTE, у інструменті моделювання NS-3. У цьому середовищі моделювання використовуються існуючі аналітичні моделі для прогнозування втрат сигналу на трасі, просторової узгодженості (Процедура A) та масштабованого згасання.

Необхідно оцінити загальну ефективність системи міліметрових хвиль за допомогою інструменту моделювання NS-3, використовуючи сценарій, який був змодельований і представлений на рисунках 3.1 і 3.2. Досліджується система, що

складається з базової станції (БС), мобільного терміналу (УТ) і безпілотного літального апарату, що виступає в якості базової станції (БПЛА-БС). Під час моделювання БПЛА-БС підключається як до мобільного терміналу, так і до базової станції за допомогою каналів зв'язку міліметрових хвиль. Базова станція розглядає безпілотний літальний апарат як звичайний мобільний термінал. З іншого боку, мобільний термінал розглядає базову станцію і безпілотний літальний апарат як дві різні базові станції.

Був використаний сценарій `mmwave-simple-erc.cc` з прикладів, доступних на [github.com/nyuwireless-unipd/mmwave](https://github.com/nyuwireless-unipd/mmwave), для моделювання передачі пакетів від мобільного терміналу (УТ) до віддаленого хоста в Інтернеті через базову станцію (БС) і Evolved Packet Core (ЕРС). Як базова станція (БС), так і безпілотний літальний апарат в якості базової станції (UAV-BS) підключені до PGW / SGW і подальше з'єднання з Інтернетом. Канал міліметрових хвиль між безпілотним літальним апаратом в якості базової станції (UAV-BS) і базовою станцією (БС) реалізований як канал між літаючим терміналом і базовою станцією рис. 3.2. Цей літаючий мобільний термінал з'єднаний з літаючою базовою станцією через внутрішній релейний інтерфейс, який робить UAV-BS прозорим для передачі пакетів між УТ і БС та навпаки. Для пристроїв mmWave використовується дуплексна схема з часовим розділом каналів (TDD).

Моделювання мережі mmWave на основі LTE з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє отримати практичну користь. Параметри моделювання наведені в табл. 3.1 рис 3.1, 3.2. Ці вузли були змодельовані в сценарії Rural Macrocell (RMa) за моделлю поширення 3GPP з використанням модуля будівель NS-3. Модель каналу 3GPP рекомендується для оцінки якості обслуговування (QoS) в системах mmWave. Хоча на даний момент сценарій RMa підтверджений тільки для частот до 7 ГГц, це реалістичний сценарій для систем міліметрових хвиль з використанням БПЛА. Під час моделювання ми розглядаємо дві основні причини низького QoS в системах mmWave: втрати сигналу на тракті та завади.

Клас `MmWave3gppBuildingPropagationLossModel` використовується для ілюстрації негативного впливу завад і втрат на трасі в системі `mmWave`. Діаграма класів подана на рис 3.3.

#### А. Втрата шляху

Для опису втрат сигналу на трасі може бути використана аналітична модель розповсюдження сигналу 3GPP. У розглянутому сценарії сільського макростільника (RMa) існують обмеження на мінімальну і максимальну висоту базових станцій (BS) і мобільних терміналів (UT). Діапазон частот для формули втрат на трасі (PL) становить  $0,8 < f_c < f_h$  ГГц, де  $f_h = 30$  ГГц для RMa. Важливо зазначити, що модель втрат на трасі RMa для діапазону частот, більших за 7 ГГц, перевіряється на основі єдиної системи вимірювань, що проводиться на частоті 24 ГГц. У даному моделюванні пакети передаються на центральній частоті 28 ГГц.

Обрані значення з відповідних діапазонів застосовності для моделювання системи з безпілотним літальним апаратом в якості базової станції (БПЛА-БС) за допомогою відповідних рівнянь. У нашому моделюванні БПЛА-БС складається з поєднання літаючого мобільного терміналу та літаючої базової станції. Рекомендована висота мобільного терміналу ( $h_{UT}$ ) становить від 1 до 10 метрів. Можлива висота базової станції ( $h_{BS}$ ) становить від 10 до 150 метрів. Вибрана висота для БПЛА-БС ( $h_p$ ) складає 10 метрів.

Для визначення втрат на трасі прямої видимості (LOS) застосовуються наступні вирази PL:

$$\begin{aligned}
 PL_{RMa-LOS} &= PL_1, 10m \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\
 PL_{RMa-LOS} &= PL_2, d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10_{km} \\
 PL_1 &= \\
 &20 \log_{10} \left( 40\pi \cdot d_{3D} \cdot \frac{f_c}{3} \right) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \\
 &- \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D} \\
 PL_2 &= PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10}(d_{3D}/d_{BP})
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

де:

- $d_{2D}$  і  $d_{3D}$  – відстані між  $UT$  та  $BS$  у  $2D$  та  $3D$ ;
- $d_{BP}$  – відстань точки перелому;
- $h$  – середня висота будівлі (за замовчуванням 5 метрів);
- $W$  – середня ширина вулиці (20 метрів за замовчуванням).

У випадку, коли канал не перебуває в зоні прямої видимості (NLOS), втрати на трасі описуються наступними рівняннями:

$$PL_{RMa-NLOS} = \max(PL_{RMa-NLOS}, PL'_{RMa-NLOS}), \text{ де } 10m \leq d_{2D} \leq 15km$$

$$PL'_{RMa-NLOS} = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(W) + \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2 \log_{10} h_{BS} + (43.42 - 3 \log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(11.75h_{UT})))^2 - 4.97)$$

(3.2)

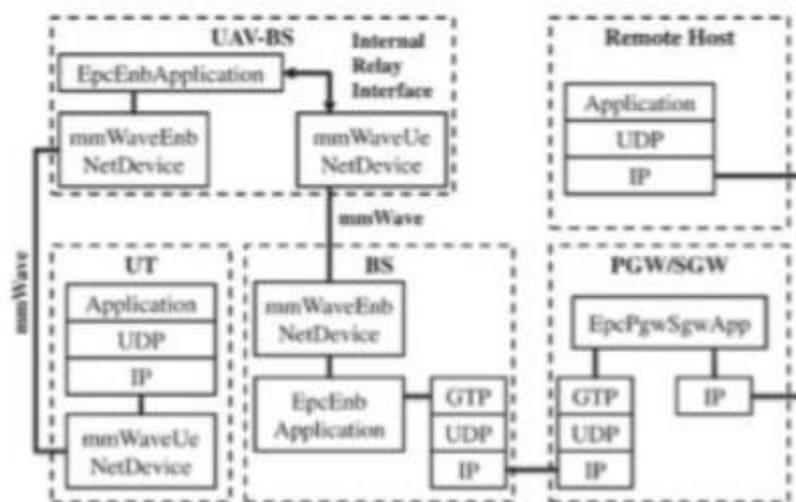


Рисунок 3.3 – Структурна схема для моделі системи mmWave з використанням БПЛА

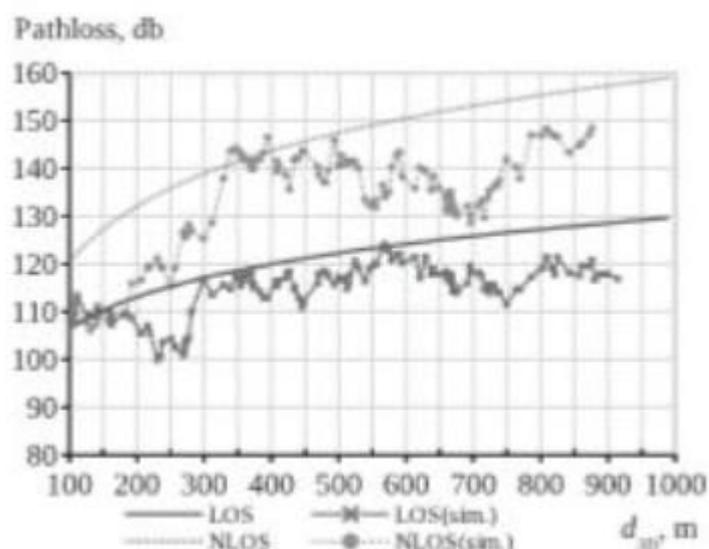


Рисунок 3.4 – Графік залежності втрат на трасі від тривимірної відстані  $d_{3D}$  між базовою станцією (BS) та мобільним терміналом (UT)

На рис 3.4 показані значення втрат на трасі для різних відстаней  $d_{3D}$  між базовою станцією (BS) та мобільним терміналом (UT) в нашому моделюванні. Лінії без маркерів відображають аналітичні значення, що базуються на рівняннях (1) і (2) для втрат на трасі. Лінії з маркерами відображають миттєві значення втрат на трасі, отримані в результаті моделювання в NS-3. Під час моделювання ми вручну встановлювали умови каналу прямої видимості (LOS) і відсутності прямої видимості (NLOS), а також переміщали мобільний термінал від базової станції зі швидкістю 10 метрів в секунду. Відстань  $d_{3D}$  між ними змінювалась від 100 до 900 метрів.

Таблиця 3.1 – Характеристики моделювання

Характеристика параметра	Величина параметра.
Несуча частота, ГГц	28
Номер антени мобільного терміналу (UT)	16
Номер антени базової станції (BS)	48
Сторона А квадрату, метри	[100..1000]
Транспортний рівень	UDP
Вихідна пропускна здатність, Мбіт/с	$\leq 100$
Потужність передавача, дБм	20

Продовження таблиці 3.1

Дрібномасштабневицвітання	включено
Висота мобільного терміналу (UT), метри	1.5
Висота блокатора, метр	1.8
Ширина блокатора, метр	0.5
Щільність блокатора ( $\rho_{block}$ ), 1 м <sup>2</sup>	[0.001...0.1]
Модель мобільності блокатора	Random
Швидкість блокатора, метри в секунду	2
Час моделювання, секунди	60
BS висота hBS, метрів	10
Висота БПЛА-БС, метри	10

### В. Блокування

У системі проводиться аналіз блокування міліметрових хвиль невеликими рухомими перешкодами. Кожен блокатор імітує блокування сигналів міліметрового діапазону. У моделюванні використовуються кубоїди зі сторонами 0,5 × 0,5 × 1,8 метра (ширина × глибина × висота), що є апроксимацією людського тіла та можуть блокувати міліметрові сигнали. Створюється квадратна область з різною кількістю людей від 90 до 9000, щоб створити ускладнення для прямого поширення сигналу між базовою станцією та мобільним терміналом. Блокатори рухаються випадковим чином зі швидкістю 2 метри в секунду, що дозволяє моделювати ситуації, коли люди скупчуються на стадіонах, у парках або на музичних фестивалях.

У рамках аналізу я досліджуємо площу квадрату зі стороною  $A$ , яка змінюється від 100 до 1000 метрів, і встановлюю співвідношення між кількістю блокуючих об'єктів і розміром області, що представляється щільністю блокуючих об'єктів ( $\rho_{block}$ ). Кількість блокуючих об'єктів ( $N_{block}$ ) обчислюється в рамках моделювання з використанням відповідного рівняння.

$$N_{block} = \rho_{block}(D_{max} - D_{min})^2 \quad (3.3)$$

де:

- $\rho_{block}$  – кількість блокуючих об'єктів на одиницю площі в  $1 \text{ м}^2$ ,
- $D_{max}$  – максимальна відстань від базової станції у метрах (вона за замовчуванням аналогічна стороні  $A$ ),
- $D_{min}$  – мінімальна відстань від базової станції у метрах (за замовчуванням 10 метрів).

### **3.2 Моделювання передачі сигналу в системі міліметрового діапазону між БПЛА та БС, а також у режимі ретрансляції**

У роботі проводиться порівняльний аналіз двох методів передачі даних у системах mmWave (з використанням БПЛА-БП та без нього) за допомогою інструменту моделювання NS-3. Канали між вузлами моделюються на основі 3GPP моделі розповсюдження на центральній частоті 28 ГГц. Безпілотний літаючий апарат (UAV-BS) використовується для ретрансляції пакетів від мобільного терміналу (UT) до базової станції (BS). Також розглядається два сценарії: відправник-одержувач (source-destination, SD) та відправник-ретранслятор-одержувач (source-retransmitter-destination, SRD).

#### **А. Джерело-місце призначення**

У сценарії відправник-одержувач (SD), мобільний термінал (UT) виступає як джерело (S), а базова станція (BS) – як призначення (D). Джерело та призначення є стаціонарними. Мобільний термінал розташований у точці з координатами  $(A, A, 1.5)$ , де  $A$  - довжина сторони квадрата. Базова станція знаходиться у точці з координатами  $(0, 0, 10)$ . Додаток на мобільному терміналі передає дані на віддалений хост в Інтернеті через місцеву базову станцію. Кожен пакет передається від мобільного терміналу до базової станції за допомогою системи mmWave, а потім маршрутується через вузли PGW/SGW до Інтернету.

#### **Б. Джерело-ретранслятор-місце призначення**

У сценарії «джерело-ретранслятор-пункт призначення» (SRD), мобільний термінал (UT) виступає як джерело (S), базова станція (BS) є пунктом

призначення (D), а ретранслятор (R) є проміжним безпілотним літаючим апаратом (UAV-BS) в центрі області. У сценарії SRD UAV-BS може транслювати пакети від UT до BS без перешкод. Мобільний термінал, базова станція і UAV-BS є стаціонарними і розташовані у точках з координатами (A, A, 1.5), (0, 0, 10) і (A / 2, A / 2, 10) відповідно. Додаток на мобільному терміналі передає дані на віддалений хост в Інтернеті, і кожен пакет передається від мобільного терміналу до UAV-BS, а потім від UAV-BS до BS за допомогою каналів mmWave. У базовій станції пакети направляються в Інтернет через вузли PGW/SGW.

### С. Характеристики якості обслуговування.

Деякі параметри, які можна використовувати для оцінки ефективності роботи такої схеми в системі mmWave, включають середню корисну пропускну здатність і виграш в корисній пропускній здатності. Середню корисну пропускну здатність можна обчислити як весь корисний обсяг даних, який успішно доставлено до пункту призначення, поділений на загальний час моделювання. Виграш в корисній пропускній здатності можна порівняти зі сценарієм без використання ретранслятора, щоб визначити, наскільки ефективно робиться передача з його участю.

$$Goodput_{ave} = buv \cdot 8/T \quad (3.4)$$

де: buf – розмір приймального буфера в байтах,

– T – час моделювання в секундах.

Обчислення приросту корисної продуктивності (GGoodput) проводиться таким чином:

$$G_{goodput} = (Goodput_{SRD}/Goodput_{SD}) - 1 \quad (3.5)$$

де:

– GoodputSRD – середня корисна пропускну здатність для сценарію джерело-ретранслятор-пункт призначення (SRD),

– GoodputSD – середня корисна пропускна здатність для сценарію джерело-пункт призначення (SD).

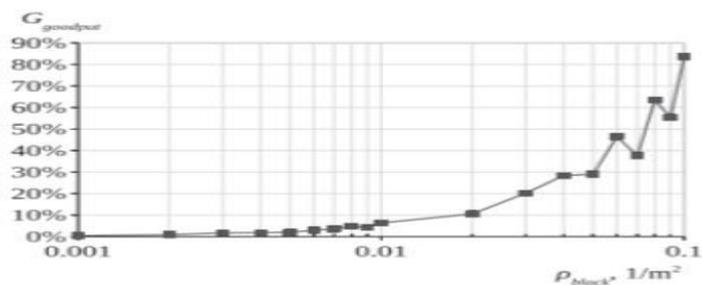


Рисунок 3.5 – Приріст корисної продуктивності (Goodput) для різних щільностей блокувальників ( $\rho_{\text{block}}$ ) у сценарії з радіусом дії 300 метрів і безпілотним літальним апаратом (БПЛА) базової станції розташованим у центрі

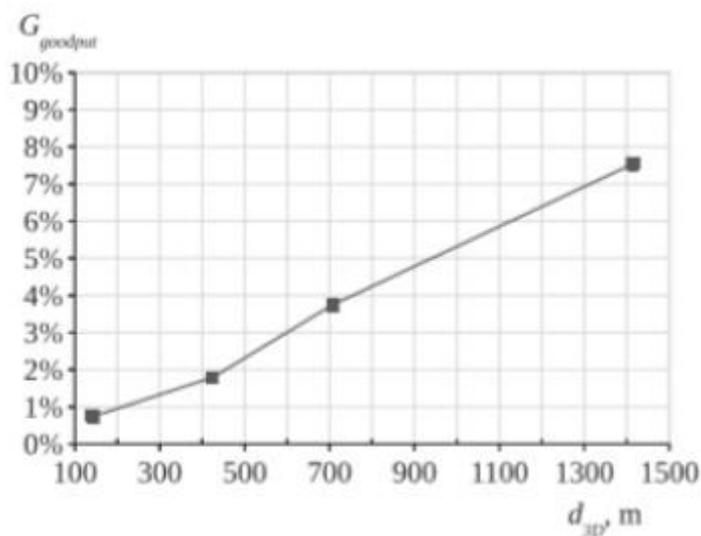


Рисунок 3.6 – Графік приросту корисної продуктивності (Goodput) для різних відстаней у тривимірному просторі ( $d_{3D}$ ) у сценарії з безпілотним літальним апаратом (БПЛА) базової станції, розташованим у центрі

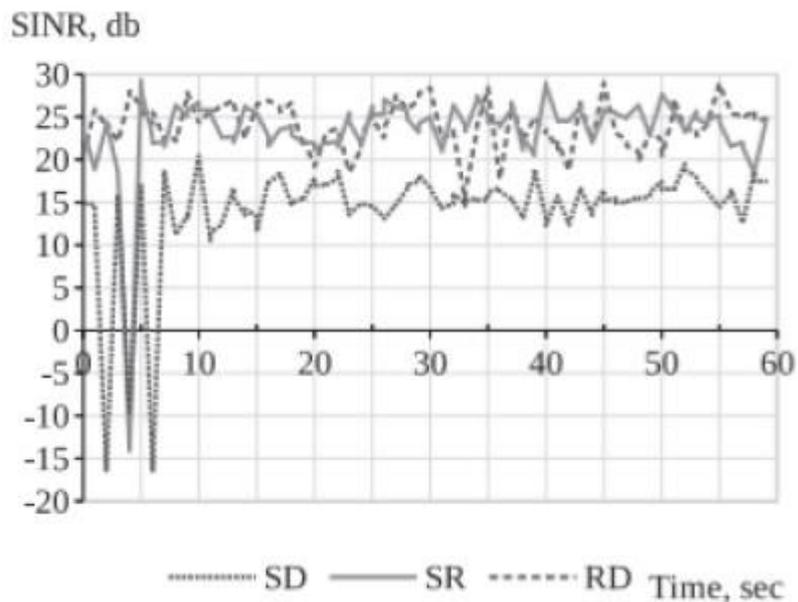


Рисунок 3.7 – Значення відношення сигнал-шум (SINR) для каналів SD, SR та RD при даному значенні щільності блокторів ( $\rho_{\text{block}} = 0,004$ ) та розмірі квадратної області ( $A = 300$ )

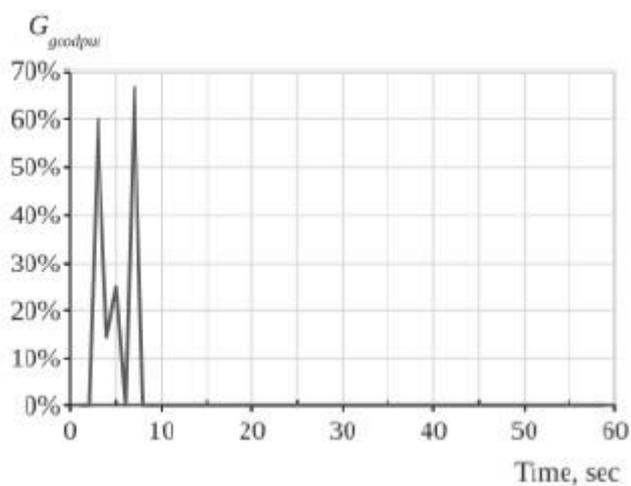


Рисунок 3.8 – Збільшення корисної потужності під час моделювання при щільності блокторів  $\rho_{\text{block}} = 0,004$  та радіусі дії  $A = 300$

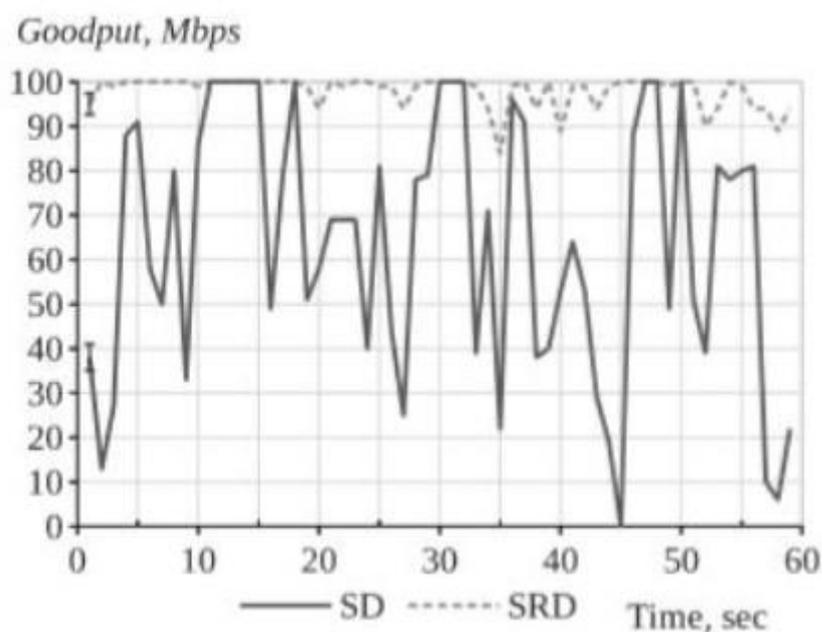


Рисунок 3.9 – Приклад значень хороших показників під час моделювання з високим блокуванням ( $\rho_{\text{block}} = 0,04$ ,  $A = 300$ )

Проведено розрахунок метрик якості обслуговування (QoS) для двох випадків: з використанням безпілотного літального апарата (БПЛА) в якості базової станції (випадок SRD) та без його використання (випадок SD). Для кожного випадку вимірювались показники при швидкостях передачі даних 10 Мбіт/с та 100 Мбіт/с і різних щільностях блокувальників від 0,001 до 0,1 блокувальників на квадратний метр. Кожен експеримент повторювали 50 разів, і тривалість кожного запуску становила 60 секунд.

### 3.3 Перегляд аналізу отриманих результатів

У симульованих сценаріях метрики якості обслуговування (QoS) залежать від фізичних параметрів через негативні втрати сигналу на маршруті та блокування. Втрати сигналу зростають зі збільшенням відстані між UT та BS. Вплив блокування збільшується зі збільшенням щільності блокувальників  $\rho_{\text{block}}$ .

На основі даних, представлених на рис 3.5, виявлено взаємозв'язок між коефіцієнтом корисної пропускнуої здатності та щільністю блокувальників. Під час усіх

прогонів моделювання сторона А становила 300 метрів, а БПЛА-БП знаходився в центрі цієї зони. Щільність блокувачів вимірюється у відношенні до квадратного метра, де щільність 0,1 блокувача / м<sup>2</sup> означає 8410 блокуючих для квадрата зі стороною 300 метрів.

Висока щільність блокувачів призводить до більшого Goodput (корисної пропускної здатності). Корпус SRD забезпечує кращу середню продуктивність для всіх точок вимірювання. Найбільший приріст в корисній пропускній здатності склав 83%, досягнутий при щільності 0,1 блокувача / м<sup>2</sup>. Найменший приріст, рівний 0%, спостерігався при щільності 0,001 блокувача / м<sup>2</sup>.

Цей зв'язок можна лінійно апроксимувати за допомогою методу найменших квадратів, щоб краще розуміти суть залежності між щільністю блокувачів та корисною пропускною здатністю.

На рис. 3.6 показана залежність коефіцієнта посилення GGoodput від відстані d3D між UT і BS. При більшій відстані d3D спостерігається більше посилення для випадку SRD. Наприклад, коефіцієнт посилення для сценарію з A = 100 метрів і d3D приблизно 141 метр становить менше 1%. Ця відстань занадто мала, щоб продемонструвати будь-який вигаш від ретрансляції через БПЛА-БП. Проте, вигаш становить 7,5% для тієї ж щільності блокуючих, коли A = 1000 метрів і d3D приблизно 1414 метрів.

На рис. 3.7 і 3.8 представлена залежність наскрізної метрики QoS GGoodput від метрики фізичного рівня SINR. На рис. 3.7 значення SINR для каналу SD між UT і BS становить приблизно 15 дБ. SINR для передачі як по каналу SR (від UT до UAV-BS), так і по каналу RD (від UAV-BS до BS) складають приблизно 25 дБ. Проте SINRSD значно гірший, ніж SINRRD на шостій секунді. SINRSR також знизився до рівня відключення одночасно з SINRSD. На рисунку 3.8 можна побачити, що випадок SRD призводить до миттєвого значення GGoodput до 60% під час моделювання. Проте в шосту секунду коефіцієнт посилення GGoodput практично дорівнює нулю.

На рис. 3.9 подано миттєві значення корисної продуктивності для іншого прогону моделювання. У всіх точках моделювання випадок SRD проявляє стійку

перевагу. Наприклад, на 9-й секунді GoodputSD складає приблизно 33 Мбіт/с, тоді як GoodputSRD досягає приблизно 100 Мбіт/с.

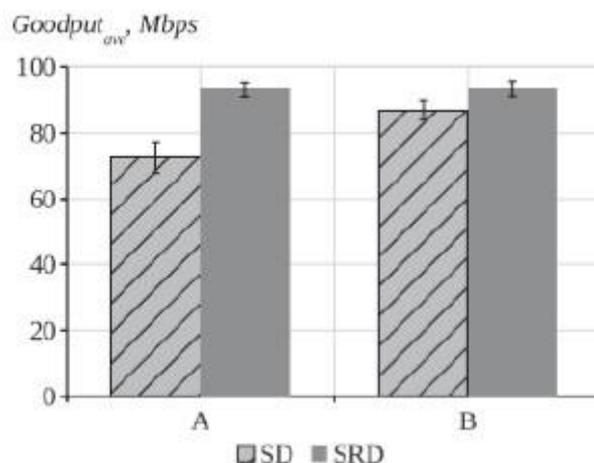


Рисунок 3.10 – Середня корисна продуктивність для випадків SRD та SD

На рис. 3.10 представлені середні значення корисної продуктивності протягом 50 прогонів моделювання для передачі з БПЛА-БС (SRD) і без нього (SD). У різних умовах дослідження розглядається вплив різних параметрів на продуктивність системи.

У лівій частині малюнка розглядається висока засміченість (з щільністю блокаторів  $\rho_{\text{block}} = 0,04$  та стороною майданчика  $A = 300$  м). Коефіцієнт посилення складає приблизно 30%. У таких умовах можна спостерігати значне вплив засміченості на корисну пропускну здатність, де система з БПЛА-БС (SRD) виявляє перевагу.

У правій частині малюнка засмічення невисоке ( $\rho_{\text{block}} = 0,004$ ), а сторона майданчика становить  $A = 1000$  метрів. Середні значення корисної пропускну здатності складають близько 95 Мбіт/с для випадку SRD та 85 Мбіт/с для випадку SD, при цьому коефіцієнт посилення  $G_{\text{Goodput}}$  приблизно 7,5%. В таких умовах різниця у продуктивності між SRD і SD менш помітна, але все ще існує.

## 4 ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 4.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку

Капітальні витрати на розробку становлять:

$$K=K1+K2 \quad (4.1)$$

де: K1– витрати на розробку, грн.;

K2– витрати на налагодження і дослідну експлуатацію програмного засобу на ПК, грн.;

### 4.2 Складові структури витрат на розробку

Складові структури витрат на розробку та реалізацію розробки розраховуються за формулою:

$$K1=Zз+Hз +Vi, \quad (4.2)$$

де: Zз – загальна зарплата розробників, грн;

Hз – нарахування на зарплату, грн;

Vi – інші витрати, грн;

Для проведення розрахунків зарплати (Zз) необхідно визначити спеціальність робітників, чисельність робітників і трудомісткість цих робіт. Для розробки проектного рішення потрібно чотири спеціалісти розробники:

- Керівник проекту(K);
- Студент-дипломник(СД);
- Консультант з економічне її частини(КЕ);
- Консультант з охорони праці(КОП);

Згідно з штатним розписом сума витрат на оплату праці робітників, з 01.01.2024р. складає:

- Керівник (викладач вищої категорії) – 107,93 грн/год;
- Консультант з економічної частини (викладач вищої категорії) – 107,93 грн/год;

- Консультант з охорони праці(викладач вищої категорії) 93,70 грн/год;

- Час витрачений керівником –  $t_k = 14$  годин.

- Час витрачений консультантом з охорони праці –  $t_{ko} = 1$  година.

- Час витрачений консультантом з економічної частини –  $t_{ke} = 1$  година.

- Час витрачений студентом дипломником  $t_s = 3 \times 50 = 150$  годин.

Витрати на оплату праці керівника проекту:

$S_k = 14 \text{ роб.год.} \times 107,93 \text{ грн.год.} = 1511,02 \text{ грн.}$

Витрати на оплату праці консультанта з економічної частини:

$S_{ke} = 1 \text{ роб.год.} \times 107,93 \text{ грн.год.} = 107,93 \text{ грн.}$

Витрати на оплату праці консультанта з охорони праці :

$S_{ko} = 1 \text{ роб.год} \times 93,70 \text{ грн.год.} = 93,70 \text{ грн.}$

Денна оплата студента дипломника :

$1510/173 = 8,73 \text{ грн.}$

1510 – стипендія

173 – місячний фонд робочого часу, годин.

Витрати на оплату праці студента дипломника

$S_s = 8,73 \times 150 = 1310 \text{ грн.}$

Витрати на оплату праці робітників проекту становлять

$Z_z = S_k + S_{ke} + S_{ko} + S_s = 1511,02 + 107,93 + 93,70 + 1310 = 3022,65 \text{ грн.}$

Нарахування на зарплату визначаються в розмірі 22% від фонду оплати праці

$N_z = Z_z \times 22\% = (3022,65 \times 22)/100 = 664,98 \text{ грн.}$

де 22 – норматив нарахування на зарплату, %

Інші витрати  $V_i$  відображають витрати які, не враховані в попередніх статтях витрат. Ці витрати розраховуються згідно структури витрат(5%)

$$Ві = 0.05 \times (Зз + Нз) = 0.05 \times (3022,65 + 664,98) = 1843,93 \text{ грн.}$$

$$К1 = Зз + Нз + Ві = 3022,65 + 664,98 + 1843,93 = 5578,56 \text{ грн.}$$

### 4.3 Витрати на відлагодження розробки

Витрати на від лагодження та дослідну експлуатацію розробки

$$К2 = S_{м-г.} \times t \quad (4.3)$$

де  $S_{м-г.}$  – вартість однієї машино-години роботи конкретно ПК, грн./год.;  
 $t$  – машинний час, витрачений на накладку та дослідну експлуатацію програмного засобу, год.

Вартість 1 машинно-години роботи ПК розраховуємо за складовими витрат на таку роботу:

$$S_{м-г.} = (A + E_n) / \Phi_d \quad (4.4)$$

де  $A$  – амортизація використаного ПК, грн;

$E_n$  – вартість електроенергії, яку споживає ПК, грн.;

$\Phi_d$  – дійсний час від лагодження програми, год.;

Розрахунок складових вартості 1 машино-години роботи ПК:

а) амортизація ПК становить

$$A = (K_T \times N_a) / 100 = (670,31 \times 15\%) / 100 = 100,55 \text{ грн.}$$

Де  $K_T$  – вартість використання ПК, грн..

$N_a$  – норма амортизації ( $N_a = 15\%$ )

$$K_T = (K_c \times T_{\text{експ}}) / T_{\text{вик}} = (14625 \times 2,2) / 48 = 670,31 \text{ грн.}$$

де  $K_c$  – вартість компютеронї системи, грн.

$T_{\text{експ}}$  – період експлуатації системи 2.2 місяців (50 робочих днів)

$T_{\text{вик}}$  – термін корисного використання 4 роки (48 місяців):

$$K_c = P_{\text{комп}} \times P\$ = 500 \times 41,00 = 14625 \text{ грн.}$$

де  $P_{\text{комп}}$  – вартість комп'ютерної системи у доларах США;

$P_{\$}$  – курс долара США по курсу НБУ на момент купівлі системи.

б) вартість використання електроенергії розраховується за формулою:

$$E_n = (P \times T_f) \times \Phi_d \times K_{\text{вик}} = (0,25 \times 5,60) \times 150 \times 0,8 = 154,8 \text{ грн.}$$

де  $P$  – потужність обчислювальної системи, кВт ( $P=0,25$ )

$K_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання ПК

$T_f$  – ціна за 1кВт/год., грн. ( $T_f = 5,16$  грн.)

$\Phi_d$  – дійсний час від лагодження програми

$$\Phi_d = \text{пр.д.} \times T_{\text{сер}} = 50 \text{ р.дн.} \times 3 \text{ год.} = 150 \text{ год.}$$

Де пр.д. – кількість робочих днів ПК

$T_{\text{сер}} = 3$  год – середній щоденний час роботи ПК

Отже вартість 1 машино-години роботи і від лагодження на ПК становить

$$S_{\text{м-г}} = (100,55 + 154,8) / 150 = 1,70 \text{ грн.}$$

Таким чином сумарні витрати на від лагодження і дослідну експлуатацію проектного рішення становлять:

$$K_2 = S_{\text{м-г}} \times \Phi_d = 1,70 \times 150 = 255 \text{ грн.}$$

Отже, капітальні витрати на розробку проектного рішення за формулою становлять:

$$K = K_1 + K_2 = 5578,56 + 255 = 5833,56 \text{ грн.}$$

Загальний кошторис витрат на розробку проектного рішення приведений в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Кошторис витрат на розробку проектного рішення

Складові елементи витрат	Умовне позначення	Сума витрат, грн
Витрати на оплату праці	Зз	3022,65
Нарахування на зарплату	Нз	664,98
Інші витрати	Ві	1843,93
Разом	$K_1$	5578,56
Витрати на відлагодження	$K_2$	255
Разом $K = K_1 + K_2$	$K$	5833,56

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЕДІЯЛЬНОСТІ

### 5.1 Загальні положення

Визначення поняття охорони праці дається в ст. 1 Закону України від 14 жовтня 1992 р. «Про охорону праці». Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. В поняття охорони праці входять і всі ті заходи, що спеціально призначені для створення особливих полегшених умов праці для жінок і неповнолітніх, а також працівників зі зниженою працездатністю. Охорону праці і здоров'я громадян віднесено до пріоритетних напрямків соціальної політики України. Так, Конституція України одним з основних соціальних прав громадян визначає право кожного на належні, безпечні й здорові умови праці, встановлює, що використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється. Завдання охорони праці:

- проектування підприємств, технологічних процесів і конструювання обладнання з обов'язковим виконанням вимог охорони праці;
- знаходження оптимальних співвідношень між різними факторами виробничого середовища, що дозволяє забезпечити мінімум несприятливого впливу їх на здоров'я працівників;
- розробка конкретних заходів щодо покращення умов праці та забезпечення її безпеки на основі застосування у виробництві новітніх досягнень науки і техніки;
- застосування раціональних засобів захисту працівників від впливу несприятливих факторів виробничого середовища, а також втілення організаційних заходів, які нейтралізують або послаблюють ступінь їх впливу на організм людини;
- розробка та застосування методів і засобів оцінки ефективності заходів з охорони праці, що плануються і здійснюються.

## 5.2 Організація охорони праці на підприємстві

На сучасному етапі науково-технічного розвитку нашої держави питання охорони праці на підприємствах є одним із найактуальніших.

Належна організація охорони праці, яка відповідає вимогам нормативно-правових актів, є основним заходом профілактики та запобігання виробничому травматизму й професійній захворюваності. Крім того, кожним трудовим договором передбачаються зобов'язання роботодавця щодо забезпечення найманих працівників безпечними умовами праці.

Законодавство України покладає на всіх роботодавців обов'язок щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці. Витрати на охорону праці на підприємстві згідно зі ст. 19 Закону повинні становити не менше 0,5% від фонду оплати праці за попередній рік, а за невиконання законодавства про охорону праці до підприємства можуть бути застосовані санкції аж до заборони його експлуатації.

Для того щоб не поставити під загрозу існування підприємства, роботодавцю необхідно:

- створити службу охорони праці.

Згідно зі ст. 15 Закону така служба обов'язково повинна бути створена на підприємстві з кількістю працюючих 50 і більше осіб відповідно до Типового положення про службу охорони праці, затвердженого наказом Держкомітету з нагляду за охороною праці від 15.11.2004 № 255. На підставі цього документа також має бути розроблено Положення про службу охорони праці цього підприємства, визначено структуру такої служби, її чисельність, основні завдання, функції та права її працівників. На підприємствах із кількістю працівників менше 50 осіб функції служби охорони праці можуть виконувати в порядку сумісництва особи, які мають відповідну підготовку.

- Розробити та затвердити на підприємстві положення, інструкції та інші акти з охорони праці.

Обов'язок роботодавця стосовно розробки та затвердження документів, які повинні встановлювати правила виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майданчиках і робочих місцях, передбачений ст. 13 Закону про охорону праці.

– Організувати проведення інструктажів з питань охорони праці.

Перед початком роботи нового працівника роботодавець згідно зі ст. 29 КЗпП зобов'язаний проінформувати його під розпис про умови праці, наявні на його робочому місці, у тому числі про всі небезпечні чи шкідливі виробничі фактори, які ще не усунуто, та про можливі наслідки їх впливу на здоров'я працівника, а також про можливі пільги та компенсації за роботу в таких умовах.

– Забезпечити навчання і перевірку знань з питань охорони праці.

Згідно зі ст. 18 Закону працівники, зайняті на роботах з підвищеною безпекою або там, де є потреба у професійному доборі, проходять спеціальне навчання і перевірку знань відповідних нормативно-правових актів з охорони праці. Таке навчання з питань охорони праці може проводитись як безпосередньо на підприємстві, так і навчальним центром.

– Подбати про проведення медичних оглядів.

Згідно зі ст. 169 КЗпП роботодавець зобов'язаний за свої кошти організувати проведення попереднього (при прийнятті на роботу) та періодичних (протягом трудової діяльності) медоглядів працівників, зайнятих на важких роботах, роботах із шкідливими чи небезпечними умовами праці або таких, де є потреба у професійному доборі. Також він зобов'язаний проводити щорічний обов'язковий медогляд осіб віком до 21 року.

– Забезпечити працівників засобами індивідуального захисту.

На роботах із шкідливими й небезпечними умовами праці, а також на роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими температурними умовами, працівникам згідно зі ст. 164 КЗпП необхідно безкоштовно видавати спеціальний одяг, взуття та інші ЗІЗ.

– Провести атестацію робочих місць.

На підприємствах, де технологічний процес, використовуване обладнання, сировина, матеріали є потенційними джерелами шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які можуть негативно впливати на стан здоров'я працюючих, повинна проводитись атестація робочих місць за умовами праці. Така атестація повинна проводитись атестаційною комісією, склад і повноваження якої визначаються наказом по підприємству в строки, передбачені колективним договором, але не рідше одного разу на 5 років. Порядок проведення такої атестації передбачений постановою КМУ від 01.08.1992 № 442. Відомості про результати атестації заносяться в картку умов праці.

– Налагодити облік нещасних випадків.

Згідно зі ст. 22 Закону «Про охорону праці» роботодавець зобов'язаний організувати розслідування та вести облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій у порядку, встановленому постановою КМУ від 30.11.2011 № 1232. За результатами такого розслідування роботодавець повинен скласти акт за формою Н-5 (якщо нещасний випадок визнано таким, що не пов'язаний з виробництвом) або Н-1 (якщо він визнаний пов'язаним з виробництвом). Один із примірників повинен видатися потерпілому або іншій зацікавленій особі не пізніше трьох днів з моменту закінчення розслідування.

### **5.3 Заходи безпеки на робочому місці**

Конструкція робочого місця, його розміри та взаємне розташування його елементів повинні відповідати антропометричним, фізіологічним і психофізіологічним характеристикам людини, а також характеру роботи.

Організація робочих місць повинна забезпечувати стійке положення та вільність рухів працівника, безпеку виконання трудових операції виключати або допускати лише в деяких випадках роботу в незручну позиціях, котрі зумовлюють підвищену втомлюваність.

Загальні принципи організації робочого місця:

- на робочому місці не повинно бути нічого зайвого; всі необхідні для роботи предмети повинні знаходитись поряд з працівником, але не заважати йому;
- ті предмети, котрими користуються частіше, розташовуються ближче, ніж ті предмети, котрими користуються рідше;
- предмети, котрі беруть лівою рукою, повинні знаходитись зліва а ті предмети, котрі беруть правою рукою, повинні знаходитись справа;
- якщо використовують обидві руки, то місце розташування інструментів вибирається з врахуванням зручності захоплення його двома руками;
- небезпечніше, з точки зору можливості травмування обладнання повинне розташовуватись вище, ніж менш небезпечне. Однак слід враховувати, що важкі предмети під час роботи зручніше опускати, ніж піднімати.

#### **5.4 Санітарно-гігієнічні вимоги**

Санітарно-гігієнічні вимоги до умов праці під час виконання роботи мають відповідати визначеним нормативам:

- параметри мікроклімату у приміщенні забезпечували комфортне самопочуття організму. Параметри мікроклімату закритих приміщень унормовані за санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99.

- освітлення приміщень та робочих місць забезпечене відповідно до встановлених вимог. Відносно вікна робоче місце розміщено так, що природне світло збоку, переважно з лівого та забезпечувало коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %. Освітленість за штучного освітлення в площині робочої поверхні становила 300 – 500 Лк. Відношення яскравості робочих поверхонь було 3:1, а яскравість робочих поверхонь і стін (іншого обладнання) – 5:1. Використана система вимикачів, що дозволяє регулювати інтенсивність штучного освітлення залежно від інтенсивності природного, а також дозволяє освітлювати тільки потрібні для роботи зони приміщення.

– Дотримані вимоги до рівнів шуму та вібрації. Було дотримано допустимих рівнів звукового тиску в октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на робочих місцях встановлені санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99.

– Надходження свіжого повітря регульоване, виходячи із відповідних нормативних.

– Передбачений захист від шуму та вібрацій.

Дотримані заходи особистої гігієни на робочому місці (підтримання чистоти, миття рук тощо). Заходи особистої гігієни на робочому місці передбачають щоденне вологе прибирання, утримання у чистоті робочого місця, наявність на робочому місці тільки необхідних для роботи засобів. На робочому місці необхідно дотримуватись вимог правил внутрішнього трудового розпорядку.

## ВИСНОВКИ

Ця робота розглядає останні досягнення дослідників у сфері використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в бездротових мережах 5G. Дослідження показує, що ця технологія є перспективним рішенням для багатьох актуальних проблем, завдяки унікальним характеристикам різних типів БПЛА. На сьогоднішній день існує ще багато невирішених питань, які потребують подальших досліджень у майбутньому. Це вказує на важливість продовження наукових зусиль для розвитку цієї області та реалізації її потенціалу в повному обсязі.

В роботі досліджено можливості використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в системах міліметрового діапазону для організації зв'язку в міських областях з великою концентрацією населення. За допомогою інструменту моделювання NS3 було проведено моделювання двох сценаріїв: з'єднання абонентського терміналу з базовою станцією та з'єднання абонентського терміналу з ретранслятором, який, в свою чергу, співпрацює з базовою станцією. Ретранслятор та базова станція були реалізовані у вигляді БПЛА.

Результати моделювання свідчать, що використання ретранслятора в наведеному випадку є доцільним. У випадку без ретранслятора спостерігається зниження корисної продуктивності через вплив завад, зумовлених густим скупченням людей на місцевості. Таким чином, впровадження ретранслятора допомагає компенсувати ці завади та забезпечити стабільний зв'язок в умовах великої концентрації народу.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. М. Ф. Сохаїл і К. Й. Леоу, «Максимальна справедливість для системи зв'язку дронів на основі NOMA», Proc. IEEE 13-а Малайзійська міжнародна конференція з комунікацій (MICC), Джохор-Бару, Малайзія 2017, сс. 119-123.
2. М. Ф. Сохаїл, К. Ю. Леоу і С. Он, «неортогональної множинний доступ для зв'язку за допомогою безпілотних літальних апаратів», IEEE Access, vol. 6. С. 22 716-22 727, 2018.
3. Дж. Бек, С. І. Хан і Ю. Хан, «Оптимальний розподіл ресурсів для неортогональної передачі в системах ретрансляції БПЛА», IEEE Wireless Commun. Lett., Vol. 7, вип. 3. С. 356-359, червень 2018 р
4. Н. Рупасінгхе, Ю. Япічі, І. Гувенц і Ю. Какішіма, «неортогональної множинний доступ для безпілотних літальних апаратів міліметрового діапазону з багатоантенною передачею», в Proc. IEEE 51-я конференція Asilomar за сигналами, системам і комп'ютерів, Пасифік Гроув, США 2017, сс. 958-963.
5. Н. Рупасінгхе, Ю. Япічі і І. Гувенц, «неортогональної множинний доступ для мереж дронів міліметрового діапазону з обмеженою зворотним зв'язком», IEEE Trans. Commun., [Електронний ресурс]. – URL <http-s://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?Tr=&arnumber=8449221>.
6. Н. Рупасінгхе, Ю. Япічі, І. Гувенц і Ю. Какішіма, «Порівняння схем обмеженою зворотного зв'язку для передачі NOMA в мережах дронів mmWave», в Proc. 19-й міжнародний семінар IEEE за досягненнями в області обробки сигналів в бездротового зв'язку (SPAWC), Каламата, Греція, червень 2018, сс. 1-5.
7. А. А. Насир, Х. Д. Туан, Т. К. Дуонг і Х. В. Бідний, «Зв'язок з БПЛА з використанням NOMA», препринт arXiv arXiv: 1806.03604, 2018.
8. Ю. Лю, З. Цинь, Ю. Цай, Ю. Гао, Г. Ю. Лі і А. Налланатха, «Зв'язок БПЛА на основі неортогональної множинного доступу», препринт arXiv arXiv: 1809.05767, 2018.

**КОПІЇ ОБОВ'ЯЗКОВИХ КРЕСЛЕНЬ**