

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ**  
**ТЕХНОЛОГІЙ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЯКОВЕЦЬ ВСЕВОЛОД ПЕТРОВИЧ**

УДК 621.396

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ**  
**МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОВІТРЯНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ПЛАТФОРМ В**  
**УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ В.П. Яковець

(підпис)

Науковий керівник: Галаган Наталія Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Яковець В.П.* Метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці методу підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності.

*Об'єктом дослідження* є процес функціонування телекомунікаційних мереж на основі повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності.

*Предметом дослідження* є методи та моделі функціонування телекомунікаційної мережі із застосуванням повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності.

*Метою дослідження* є підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ шляхом поліпшення показників енергоефективності та якості обслуговування в умовах невизначеності.

В процесі досягнення зазначеної мети та вирішення наукового завдання у роботі одержано основні наукові результати:

*Удосконалено* математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем в умовах невизначеності на базі теорії завадозахищеності, яка відрізняється від існуючих тим, що окрім адитивного гаусівського шуму враховує зміну коефіцієнту передачі варіантів багатопозиційного сигналу з амплітудно-фазорізницевою модуляцією внаслідок завмирань сигналу, що забезпечує заданий рівень достовірності передавання інформації в умовах завад.

*Удосконалено* метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-базової станції для обслуговування наземних користувачів, який на відміну від існуючих, базується на удосконаленій математичній моделі каналу обміну між базовою станцією та користувачем і, за рахунок визначення ступенів важливості абонентів на основі їх параметрів руху відносно БПЛА-БС та параметрів каналу між БПЛА-БС і абонентами, дозволяє оптимізувати точність розташування та витрати енергії вузлів телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності.

*Вперше розроблено* функціонально-структурну модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі, яка базується на методі визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-базової станції для обслуговування наземних користувачів з урахуванням параметрів каналу зв'язку та мінімізації енергетичних витрат на маневрування повітряних безпілотних платформ, що дозволяє приймати рішення щодо ефективного розташування вузлів мережі з оптимальною точністю в умовах невизначеності.

У роботі проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж та факторів, що впливають на якість їх функціонування в умовах невизначеності. Визначено ключові показники ефективності аерокосмічних телекомунікаційних мереж та проаналізовано особливості взаємодії вузлів мережі на основі повітряних платформ.

В роботі розроблено та обґрунтовано математичну модель телекомунікаційної мережі із застосуванням повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності. Визначено ключові параметри інтеграції телекомунікаційних мереж з використанням повітряних безпілотних платформ. Досліджено методи визначення місцезнаходження БПЛА в діючій телекомунікаційній мережі та створено математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем з врахуванням завмирання сигналу.

В роботі запропоновано методи поліпшення показників якості телекомунікаційних мереж в умовах невизначеності. Проведена оцінка параметрів передачі даних телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ. Запропоновано метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА з врахуванням енергоефективності для застосування в умовах невизначеності.

В роботі представлено метод підвищення якості функціонування мережі з використанням БПЛА в умовах невизначеності. Показано впровадження HAPS у якості повітряної обчислювальної платформи. Розроблено імітаційну модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі на базі методу забезпечення максимальної ефективності обміну даними в мережевій інфраструктурі в умовах невизначеності.

Розроблена функціонально-структурна модель на базі методу динамічного розташування БПЛА-базової станції з врахуванням параметрів каналу дозволяє при зменшенні якості покриття на 4% покращити середні показники енергоспоживання повітряних безпілотних платформ в 1,4 рази, в порівнянні з існуючими методами на основі LSTM-A2C та методом на основі відносної відстані, що є прийнятним в практичних застосуваннях.

Розроблена функціонально-структурна модель взаємодії між UE, БПЛА-БС та HAPS дозволила оцінити показники пропускну здатності та наскрізної затримки в інтегрованій аерокосмічній телекомунікаційній мережі. За результатами моделювання середня затримка каналу телеметрії у вузькосмуговому L-діапазоні становить 74,391 мс при пропускну здатності 296 кбіт/с. Для архітектури UE-БПЛА-HAPS у межах запропонованої моделі отримано середню наскрізну затримку 1,33 мс для висхідного та 4,259 мс для низхідного каналу зв'язку, що відповідає вимогам до аерокосмічних систем зв'язку, встановлених 3GPP.

Розроблений в роботі сервіс на основі функціонально-структурної моделі інтеграції БПЛА пройшов практичну перевірку архітектури (локальний PoC), що підтвердила працездатність запропонованого підходу, ефективну взаємодію ендпоінтів сервісу та DroneKit-клієнту, коректну обробку одночасних запитів, базову стійкість до розривів зв'язку та середній час обробки запитів у межах 15-30 мс та середньою кількістю запитів в черзі, що становить 0,9 запитів в секунду.

**Ключові слова:** супутниковий зв'язок, аерокосмічні телекомунікаційні мережі, інтегровані телекомунікації, безпілотні літальні апарати, висотні/атмосферні платформи, повітряні платформи, умови невизначеності, навігація, системна інтеграція, енергоефективний зв'язок.

**ANNOTATION**

*Yakovets V.P.* A method for improving the performance of telecommunications networks using aerial unmanned platforms under conditions of uncertainty. – Scientific qualification work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 172 “Telecommunications and Radio Engineering”. – State University of Information and Communication Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

This dissertation is devoted to the development of a method for improving the performance of telecommunications networks using aerial unmanned platforms under conditions of uncertainty.

*The subject of the study* is the operation of telecommunications networks based on aerial unmanned platforms under conditions of uncertainty.

*The object of the study* is the methods and models of telecommunications network operation using aerial unmanned platforms under conditions of uncertainty.

*The aim of the study* is to improve the efficiency of telecommunications networks using aerial unmanned platforms by enhancing energy efficiency and quality of service under conditions of uncertainty.

In the process of achieving the stated goal and addressing the research problem, the following key scientific results were obtained:

*Improved* the mathematical model of the information exchange channel between the base station and the user under conditions of uncertainty based on the theory of noise immunity, which differs from existing models in that, in addition to additive Gaussian noise, it accounts for changes in the transmission coefficient of multi-position signal variants with amplitude -phase difference modulation due to signal fading, which ensures a specified level of information transmission reliability under interference conditions.

*Improved* the method for determining the optimal location of a UAV-base station to serve ground users; unlike existing methods, it is based on an improved mathematical model

of the communication channel between the base station and the user and, by determining the importance levels of subscribers based on their motion parameters relative to the UAV-BS and the channel parameters between the UAV-BS and subscribers, allows for the optimization of the positioning accuracy and energy consumption of telecommunications network nodes under conditions of uncertainty.

*For the first time*, a functional-structural model for integrating UAVs into an aerospace network has been developed, based on a method for determining the optimal location of a UAV -base station for serving ground users, taking into account communication channel parameters and minimizing energy costs for maneuvering unmanned aerial platforms, which allows for making decisions regarding the effective placement of network nodes with optimal accuracy under conditions of uncertainty.

This paper analyzes current trends in the development of telecommunications networks and factors affecting the quality of their operation under conditions of uncertainty. Key performance indicators for aerospace telecommunications networks are identified, and the characteristics of network node interaction based on aerial platforms are analyzed.

This paper develops and justifies a mathematical model of a telecommunications network utilizing aerial unmanned platforms under conditions of uncertainty. Key parameters for the integration of telecommunication networks using unmanned aerial platforms are identified. Methods for determining the location of UAVs in an operational telecommunication network are investigated, and a mathematical model of the information exchange channel between the base station and the user is created, taking signal fading into account.

The paper proposes methods for improving the quality of telecommunications networks under conditions of uncertainty. An assessment of data transmission parameters for telecommunications networks using unmanned aerial platforms has been conducted. A method for determining the optimal location of a UAV, taking energy efficiency into account, is proposed for use under conditions of uncertainty.

This paper presents a method for improving network performance using UAVs under conditions of uncertainty. It demonstrates the implementation of HAPS as an aerial computing platform. A simulation model for integrating UAVs into an aerospace network

has been developed based on a method for ensuring maximum data exchange efficiency in network infrastructure under conditions of uncertainty.

A functional-structural model based on the method of dynamic positioning of UAV base stations, taking into account channel parameters, allows for a 1.4-fold improvement in the average energy consumption of aerial unmanned platforms while reducing coverage quality by 4%, compared to existing methods based on LSTM-A2C and the relative distance method, which is acceptable for practical applications.

The developed simulation model of interaction between the UE, UAV-BS, and HAPS allowed for the evaluation of throughput and end-to-end delay metrics in an integrated aerospace telecommunications network. According to the simulation results, the average delay of the telemetry channel in the narrowband L-band is 74.391 ms at a throughput of 296 kbit/s. For the UE-UAV-HAPS architecture within the proposed model, an average end-to-end delay of 1.33 ms for the uplink and 4.259 ms for the downlink was obtained, which meets the requirements for aerospace communication systems established by 3GPP.

The service developed in this work, based on a functional-structural model of UAV integration, underwent a practical architecture validation (local PoC), which confirmed the viability of the proposed approach, effective interaction between the service endpoints and the DroneKit client, correct handling of concurrent requests, basic resilience to communication interruptions, and an average request processing time of 15–30 ms with an average number of requests in the queue of 0.9 requests per second.

**Keywords:** satellite communications, non-terrestrial communication networks, integrated telecommunications, unmanned aerial vehicles, high-altitude/atmospheric platforms, aerial platforms, conditions of uncertainty, data exchange security, navigation, system integration, energy-efficient communications.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Статті у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК України*

1. Яковець В.П., Макаренко А.О., Гринкевич Г.О., Хаб'юк Н.С. Перспективи використання БПЛА-ретрансляторів в інтегрованих TN та NTN-мережах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2022. №1 (74). С. 36-46. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.013646>.
2. Яковець В.П., Макаренко А.О., Руденко Н.В., Скрипнік В.В. Застосування машинного навчання під час інтеграції супутникового та БПЛА зв'язку. *Зв'язок*. 2023. №1 (161). С. 3-9. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.010309>.
3. Яковець В.П., Горохов О.С., Колесніков О.Е., Руденко С.В., Гарячий А.Л., Швець Д.М. Проблеми імплементації інтегрованої супутниково-наземної NTN-мережі. // *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. №1 (5). С. 112-119. URL: <https://doi.org/10.31673/2518-7678.2024.011414>.
4. Макаренко А.О., Яковець В.П., Горохов О.С. Бюджет каналу інтегрованої системи стільниково-супутникового зв'язку. // *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. №2 (6). С. 14-20. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.024589>.
5. Горохов О.С., Яковець В.П., Макаренко А.О. Позиціонування абонентського обладнання в мережах 5G з використанням випередження часу. // *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2025. №1 (7). С. 26-32. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2025.016173>.
6. Яковець В.П., Колесніков О.Е., Руденко С.В., Швець Д.М. Метод маршрутизації на основі машинного навчання в телекомунікаційних системах з використанням БПЛА. // *Зв'язок*. 2025. №4 (176). С. 19-25. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2025.049695>.
7. Яковець В.П., Руденко С.В., Колесніков О.Е., Швець Д.М. Конфіденційна передача даних в телекомунікаційних системах з інтеграцією БПЛА. // *Наукові*



записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2025. №2 (8). С. 89-97. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2025.025427>.

*Статті у періодичних наукових виданнях, які входять до наукометричної бази Web of Science*

8. Spatial Modulation of Signals Using Polarization Methods for Wireless Communication Systems in the Optical and Radio Bands. Yana Kremenetskaya; Anatoliy Makarenko; Natalia Rudenko; Vsevolod Yakovets; Andriy Lemeshko; Nazarii Blazhenyi. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 10-14 October 2022. Kyiv, Ukraine. **(Web of Science)**.

*Матеріали й тези доповідей на конференціях*

9. О.С. Горохов, В.П. Яковець, А.О. Макаренко. «Методи покращення ємності транспортних мереж мобільного зв'язку», *Перспективи та проблематика інтелектуальних систем*. Київ, 31 травня 2024 р., С. 22-24.

10. В.П. Яковець, «Перспективи застосування БПЛА-ретрансляторів в мережах зв'язку», *Telecommunication: problems and innovation*. Київ, січень 2024 р.

11. В.П. Яковець, «Координація БПЛА-БС з застосуванням спірального алгоритму», *Telecommunication: problems and innovation*. Київ, січень 2024 р.

12. В.П. Яковець, О.Е. Колесніков, «Архітектура багаторівневої телекомунікаційної системи стандарту 5G», *Сучасне суспільство напрями розвитку*. Київ, 11 грудня 2024 р., С. 334-336.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ТА ФАКТОРІВ, ЯКІ ЗНИЖУЮТЬ ЯКІСТЬ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ .....	18
1.1 Основні характеристики сучасних телекомунікаційних мереж .....	18
1.2 Ключові показники ефективності аерокосмічних мереж.....	25
1.3 Аналіз взаємодії вузлів телекомунікаційних мереж на основі повітряних платформ .....	37
Висновки до розділу 1 .....	48
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОВІТРЯНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ПЛАТФОРМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ .....	50
2.1 Ключові параметри інтеграції телекомунікаційних мереж з використанням повітряних безпілотних платформ .....	50
2.2 Методи визначення місцезнаходження БПЛА в діючій телекомунікаційній мережі .....	62
2.3 Удосконалення математичної моделі каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем в умовах невизначеності з врахуванням завмирання сигналу .....	70
Висновки до розділу 2 .....	75
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ .....	77
3.1 Оцінка параметрів передачі даних телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ .....	77
3.2 Метод визначення енергоспоживання БПЛА для зміни місцезнаходження ....	83
3.3 Метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-БС для обслуговування наземних користувачів .....	90

Висновки до розділу 3 .....	103
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....	105
4.1 Впровадження NAPS у якості повітряної обчислювальної платформи в умовах невизначеності .....	105
4.2 Розробка функціонально-структурної моделі інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі .....	109
4.3 Симуляційне моделювання методу підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ.....	122
Висновки до розділу 4 .....	125
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	130
ДОДАТКИ .....	143
Додаток А .....	143
Додаток Б.....	144
Додаток В .....	146
Додаток Г .....	149
Додаток Д .....	153
Додаток Е.....	159
Додаток Є .....	161
Додаток Ж .....	167

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AKMЗ	–	Аерокосмічна мережа зв'язку (Non-Terrestrial Network)
AWGN	–	Адитивний білий гаусівський шум (Additive White Gaussian Noise)
CNPC	–	Канал контролю і зв'язку (Control and Non-Payload Communication)
CSI	–	Інформація про стан каналу (Channel State Information)
CU	–	Центральний блок (Central Unit)
DL	–	Низхідний канал зв'язку (Downlink)
DU	–	Розподілений блок (Distributed Unit)
GA	–	Генетичний алгоритм (Genetic Algorithm)
HAP	–	Висотна платформа (High Altitude Platform)
HAPS	–	Висотна станція (High Altitude Platform Station)
ICIC	–	Координація міжстільникових завад (Inter-Cell Interference Coordination)
LEO	–	Низька навколоземна орбіта (Low Earth Orbit)
NSA	–	Неавтономна архітектура (Non-Stand Alone)
QoS	–	Якість обслуговування (Quality of Service)
RRC	–	Протокол управління радіоресурсами (Radio Resource Control)
SA	–	Автономна архітектура (Stand Alone)
SBA	–	Архітектура, заснована на послугах (Service-Based Architecture)
SCA	–	Метод послідовного опуклого наближення (Successive Convex Approximation)
SCTP	–	Протокол передачі управління потоком (Stream Control Transmission Protocol)
SINR	–	Відношення сигнал/завада плюс шум (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio)
UL	–	Висхідний канал зв'язку (Uplink)
URLLC	–	Наднадійний зв'язок з низькою затримкою (Ultra-Reliable Low-Latency Communication)

**Актуальність теми.** Стрімкий розвиток мобільних систем п'ятого покоління (5G) супроводжується зростанням вимог до глобальності покриття, високої пропускної здатності, мінімальної затримки та безпеки каналів зв'язку. Однак у умовах невизначеності якості функціонування традиційних мереж зв'язку з суттєво знижується. В умовах воєнних дій в Україні телекомунікаційна інфраструктура зазнає значних пошкоджень, що ускладнює забезпечення стійкого зв'язку для критичної інфраструктури та населення. Інтеграція повітряних безпілотних платформ та висотних платформ HAPS стає перспективним рішенням для швидкого розгортання тимчасових аерокосмічних мереж у зонах з обмеженим або зруйнованим покриттям.

Існуючі підходи недостатньо враховують специфіку невизначеності: стохастичний характер повітряно-наземних каналів, обмежену енергоемність платформ та невизначеність місцезнаходження БПЛА. Аналіз сучасного стану та проблем інтеграції аерокосмічних телекомунікаційних мереж показує, що ключові показники ефективності аерокосмічних мереж знижуються саме через відсутність комплексних математичних моделей і методів, адаптованих до реальних умов невизначеності.

Тому розробка методу підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ у умовах невизначеності є актуальною. Результати роботи, зокрема математична модель мережі з урахуванням завмирання сигналу, методи оцінки енергоефективності БПЛА та імітаційна модель впровадження HAPS, дозволять суттєво підвищити стійкість мереж у кризових умовах, що має важливе практичне значення для України та відповідає глобальним тенденціям розвитку телекомунікаційних мереж і АКМЗ.

Дослідженню повітряних безпілотних систем, завадостійкості та функціонуванню телекомунікаційних систем в умовах надзвичайного стану, методів підвищення ефективності мереж зв'язку та інтеграції повітряних безпілотних платформ до аерокосмічних систем зв'язку присвячено роботи вчених: Я.А. Кременецької [8], Л.О. Уривського [19, 72], Ю.В. Мельника [47, 90], В.А. Савченка

[50, 77], Ю.В. Пепи [53], Н.В. Коршун [100, 105], Б.Ю. Жураковського [39], Л.Н. Беркман [73], Н.В. Галаган [2, 8], та зарубіжних вчених К. Амететті [25], А. Золіча [42], М. Бакірсі [44], Т. Сакамото [66], А.Ф.М. Шахен Шаха [74], та ін.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ на основі поліпшення їх енергоефективності в умовах невизначеності.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні **задачі**:

1. Проаналізувати розвиток сучасних телекомунікаційних мереж та визначити ключові показники ефективності в умовах невизначеності.

2. Удосконалити математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем з врахуванням завмирання сигналу.

3. Удосконалити метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА з врахуванням енергоефективності для застосування в умовах невизначеності при допустимих обмеженнях в якості покриття.

4. Розробити функціонально-структурну модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі.

**Об'єкт дослідження** – процес функціонування телекомунікаційних мереж на основі повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності.

**Предмет дослідження** – методи та моделі функціонування телекомунікаційної мережі із застосуванням повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач використовувалися: методи системного аналізу, теорія ймовірностей, методи оптимізації, імітаційне моделювання та порівняльний аналіз ефективності телекомунікаційних мереж, методи цифрової обробки сигналів, аналіз радіоканалів, теорія надійності, теорія оптимальної фільтрації та статистичного оцінювання, оптимального управління.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

*Удосконалено* математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем в умовах невизначеності на базі теорії завадозахищеності, яка відрізняється від існуючих тим, що окрім адитивного гаусівського шуму враховує зміну коефіцієнту передачі варіантів багатопозиційного сигналу з амплітудно-

фазорізницевою модуляцією внаслідок завмирань сигналу, що забезпечує заданий рівень достовірності передавання інформації в умовах завад.

*Удосконалено* метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-базової станції для обслуговування наземних користувачів, який на відміну від існуючих, базується на удосконаленій математичній моделі каналу обміну між базовою станцією та користувачем і, за рахунок визначення ступенів важливості абонентів на основі їх параметрів руху відносно БПЛА-БС та параметрів каналу між БПЛА-БС і абонентами, дозволяє оптимізувати точність розташування та витрати енергії вузлів телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності.

*Вперше розроблено* функціонально-структурну модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі, яка базується на методі визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-базової станції для обслуговування наземних користувачів з урахуванням параметрів каналу зв'язку та мінімізації енергетичних витрат на маневрування повітряних безпілотних платформ, що дозволяє приймати рішення щодо ефективного розташування вузлів мережі з оптимальною точністю в умовах невизначеності.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно.

У роботах, які опубліковано у співавторстві, особисто здобувачу належать: в [1] представлено опис та візуалізацію запропонованої системи методів призначення стільників та розвантаження інтегрованих АКМЗ-рішень; в [2] представлено модель згорткової нейронної мережі для виявлення завад в мережах зв'язку з використанням БПЛА; в [3] розглянута проблематика імплементації багаторівневої мережевої архітектури з інтегрованими елементами супутникової та наземної мережі; в [4] запропоновано концепцію меж нормалізованого доплерівського зсуву для розрахунку фактичного зсуву в закритій формі. Розглянуто методи вибору міжсупутникових каналів зв'язку з врахуванням доплерівського зсуву; в [5] запропоновано метод позиціонування абонентського обладнання методом мультилатерації на основі даних про Timing Advance. Представлено метод позиціонування з врахуванням перетворення географічних координат в прямокутну проєкцію Гауса-Крюгера; в [6]

запропоновано метод інтеграції машинного навчання для маршрутизації в телекомунікаційних системах з використанням БПЛА в рамках концепції FANET; в [7] розроблено моделі волоконно-ефірної передачі сигналів з оптичним поляризаційним мультиплексуванням з МІМО. Досліджено методи просторової модуляції сигналів з застосуванням поляризаційних ефектів для збільшення спектральної та енергетичної ефективності. В [8] проаналізовано використання поляризаційної обробки та поєднання оптичних і радіоканалів у fiber-wireless мережах для підвищення інформаційної ємності, спектральної ефективності та зменшення впливу атмосфери.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати представлялись та обговорювались на українських та міжнародних конференціях: IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (2022), Перспективи та проблематика інтелектуальних систем (Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій – 2024), Telecommunication problems and innovation (Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій – 2024), Сучасне суспільство напрями розвитку (Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая – 2024).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота була виконана в рамках:

- науково-дослідної роботи «Функціонування комунікаційних мереж в умовах надзвичайного стану», ТОВ «ТриМоб» – Договір № 2-217 від 11.10.2024.
- науково-дослідної роботи «Методи та засоби оптимізації параметрів та ресурсів електронних комунікаційних мереж ІКС із застосуванням ШІ», ТОВ «ТриМоб» – Договір № 11/25 від 03.12 2025 р.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблений метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності дозволяє використання операторами мобільних мереж для оптимізації завантаженості каналів та забезпечення безперервності зв'язку в умовах високої мобільності абонентів. Математичні моделі каналу для обміну інформацією між базовою станцією і користувачем з врахуванням



завмирання сигналу та підвищення енергоефективності, а також розроблена в роботі функціонально-структурна модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі можуть бути використані при створенні стандартів аерокосмічних систем зв'язку із застосуванням повітряних безпілотних платформ та дозволяють прогнозувати продуктивність мереж у різних сценаріях та мінімізувати витрати на їхнє розгортання.

Розроблений метод динамічного розташування БПЛА-БС з врахуванням параметрів каналу за середньою кількістю UE в зоні покриття при зменшенні якості покриття на 4% показав середнє зменшення енергоспоживання в 1,4 рази, в порівнянні з існуючими методами на основі LSTM-A2C та методом на основі відносної відстані.

Розроблена імітаційна модель взаємодії між UE, БПЛА-БС та HAPS, за результатами моделювання показує середню затримку 74,391 мс і пропускну здатність 296 кбіт/с каналу телеметрії у вузькосмуговому L-діапазоні, середню наскрізну затримку каналу UE-БПЛА-HAPS в 1,33 мс для висхідного і 4,259 мс для низхідного каналу зв'язку, що відповідає вимогам до аерокосмічних систем зв'язку, встановлених 3GPP. Практична перевірка архітектури показала ефективну роботу ендпоінтів, хелперів та DroneKit-клієнту, гарантують надійність передачі даних, коректну обробку одночасних запитів з середньою швидкістю обробки в 15-30 мс і базову стійкість до розривів зв'язку.

Всі зазначені вище результати можуть бути застосовані у плануванні реальних мереж для забезпечення аварійного відновлення зв'язку, а також для розширення покриття у віддалених або важкодоступних регіонах. Результати наукових досліджень прийняті та впроваджені в: ТОВ «СД Профзв'язок», ТОВ «НАЦІОНАЛЬНИЙ РЕФЕРЕНТ ЦЕНТР», а також у науково-технічну діяльність та начальний процес Інституту телекомунікацій ДУІКТ.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 107 найменувань на 13 сторінках та восьми додатків. Повний обсяг дисертації складає 170 сторінок, з них 117 сторінок основного тексту, що містять 23 рисунків та 15 таблиць.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ТА ФАКТОРІВ, ЯКІ ЗНИЖУЮТЬ ЯКІСТЬ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

### **1.1 Основні характеристики сучасних телекомунікаційних мереж**

Перехід на стандарт 5G необхідний у зв'язку з тим, що мережі четвертого покоління не можуть впоратись з великими об'ємами інформації, що надходять при використанні ресурсовитратних послуг та застосувань, таких як стрімінг, автоматизація виробництва, віддалене керування та хірургія, штучний інтелект, хмарні обчислення, тощо. П'яте покоління стане повноцінною заміною 4G завдяки кращим показникам швидкості передачі, покриття та надійності [9].

Системи мобільного зв'язку п'ятого покоління працюють на інших частотах з застосуванням інших антен в порівнянні з попередніми мережами 4G. 5G використовує спектр вкрай високих частот діапазону 30-300 ГГц (міліметрові хвилі – MMX, mmWave). Високі частоти дозволяють забезпечити більш високу швидкість передачі даних та ємність мережі. Цей діапазон частот не перевантажений стільниковим зв'язком та може задовільнити зростаючі потреби до пропускної здатності. Вкрай високі частоти характеризуються чіткою спрямованістю передачі сигналів, цей діапазон дозволяє паралельну передачу радіосигналів з іншими безпроводовими пристроями не спричиняючи інтерференцію [10].

Передача даних в 5G здійснюється на більш коротких хвилях, тому розмір антен може бути набагато меншим, ніж в системах четвертого покоління, забезпечуючи при цьому більш точну спрямованість передачі. Одна базова станція п'ятого покоління може вміщати більше антен з змінною діаграмою спрямованості в порівнянні з 4G, тому 5G може підтримувати більше підключених пристроїв на метр [11].

Серед недоліків вкрай високих частот можна виділити передачу сигналу у межах прямої видимості між антеною та приймальним пристроєм та високе загасання радіохвиль цього діапазону при передачі на далекі відстані, із-за високого атмосферного поглинання та перешкод. Через ці особливості діапазону при

впровадженні 5G, для забезпечення передачі даних на великі відстані, постане необхідність використання великої кількості ретрансляторів.

Мережі 5G, на відміну від попереднього покоління, здатні до адаптації до різних типів контенту і перемикання в режим зниженого енергоспоживання, у випадках, коли пристрій працює на низьких швидкостях або знаходиться в режимі очікування, і в необхідний момент повертатись в режим підвищеної швидкості передачі для надання критичних до затримки послуг, таких як передача потокового відео в високій якості [12].

Архітектуру 5G складають так звані «мережеві функції» (Network Function – NF), замість «традиційних» мережевих об'єктів (Network Entity), що характеризується терміном SBA (Service-Based Architecture – Архітектура, заснована на послугах) [13]. NF пропонують свої послуги іншим авторизованим NF та/або будь-яким авторизованим «споживачам» через виділені інтерфейси структури для забезпечення модульності і перевикористання ресурсів. На Рисунку 1.1 показана архітектура системи 5G.

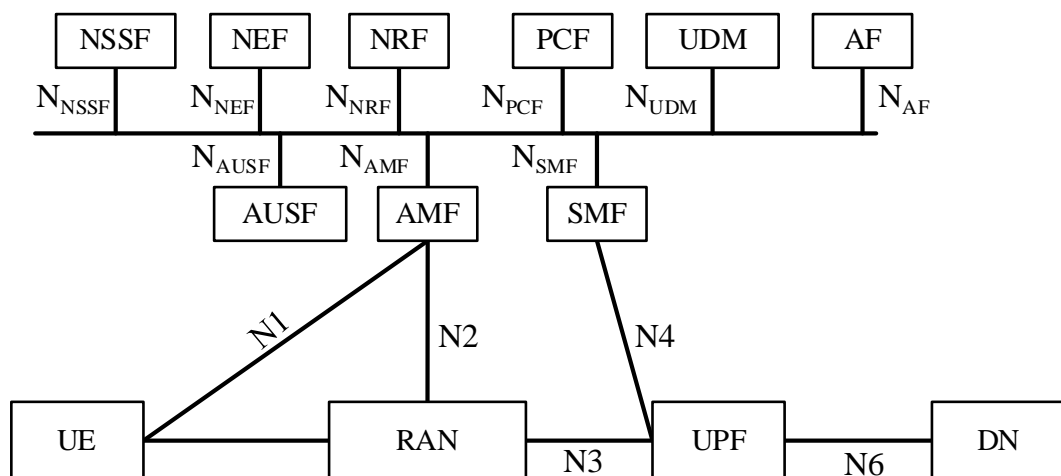


Рис. 1.1. Архітектура 5G-системи

На нижньому рівні Рисунку 1.1 зображені мережеві функції (NF) і елементи площини користувача, що беруть участь у передачі користувацьких даних. У верхній частині рисунку перелічені NF в площині сигналізації. У цьому першому підході показані наступні NF:

- UE, NG-RAN або (R)AN, UPF і AMF;

- Зовнішня мережа передачі даних (Data Network – DN), в основному в площині користувача;
- Функція додатків (Application Function – AF), що керує додатками (з можливим залученням також у площині користувача);
- Функція управління сеансами (Session Management Function – SMF), яка обробляє виклики та сеанси і відповідно контактує з UPF
- Уніфіковане управління даними (Unified Data Management – UDM), функціонально схоже на HSS 3G і 4G (і HLR 2G);
- Функція контролю політики (Policy Control Function – PCF), яка контролює, щоб трафік даних користувача не перевищував узгоджену пропускну здатність носія (носіїв);
- Функція мережевого репозиторію (Network Repository Function – NRF), яка «контролює» інші NF, надаючи підтримку для реєстрації, зняття з реєстрації та оновлення NF та їхніх сервісів;
- NF, пов'язані з безпекою: Функція мережевої експозиції (Network Exposure Function – NEF), Функція сервера автентифікації (Authentication Server Function – AUSF), Функція якоря безпеки (Security Anchor Functionality – SEAF);
- Функція вибору сегмента мережі (Network Slice Selection Function – NSSF).

Система тарифікації перейшла від автономної та онлайн тарифікації на основі діаметру до конвергентної тарифікації з інтерфейсом на основі послуг (Service Based Interface – SBI), як визначено в TS 32.240, щоб оператори могли монетизувати різноманітні функції та послуги 5GS.

Для 5G визначено два варіанти розгортання: [14]

- 1) Неавтономна архітектура (Non-Stand Alone – NSA), де мережа радіодоступу 5G (AN) і її NR-інтерфейс використовується з існуючою інфраструктурою LTE і EPC, завдяки чому технологія NR не потребує заміни мережі. Така архітектура підтримує лише послуги 4G, але з розширеними можливостями 5G NR. E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC) це варіант архітектури 3, тобто приклад неавтономної архітектури.

- 2) Автономна архітектура (Stand-Alone – SA), це архітектура з підтримкою повного набору послуг 5G фази 1, в якій NR підключена до 5G CN.

NSA це тимчасовий крок до повноцінного впровадження 5G. В цій архітектурі базова станція 5G-NR (логічний вузол «en-gNB») підключається до базової станції LTE (логічний вузол «eNB») за допомогою інтерфейсу X2. Інтерфейс X2 був представлений до випуску 15 для з'єднання двох eNB. У версії 15 він також підтримує підключення eNB і en-gNB для забезпечення NSA.

NSA пропонує подвійне підключення, як через 4G AN (E-UTRA), так і через 5G AN NR. Тому його ще називають «EN-DC», що означає «подвійне підключення E-UTRAN і NR». У EN-DC eNB 4G є головним вузлом (MN), а en-gNB 5G – вторинним вузлом (SN). В свою чергу SA це вже повноцінне впровадження 5G, що не потребує 4G для роботи. NR-БС (логічний вузол «gNB») з'єднуються через інтерфейси Xn, а мережа доступу (так звана «NG-RAN для архітектури SA») взаємодіє з 5GC через інтерфейс NG [15]. Стек протоколів площини управління між UE і SMF, через AMF, показаний на Рисунку 1.2.

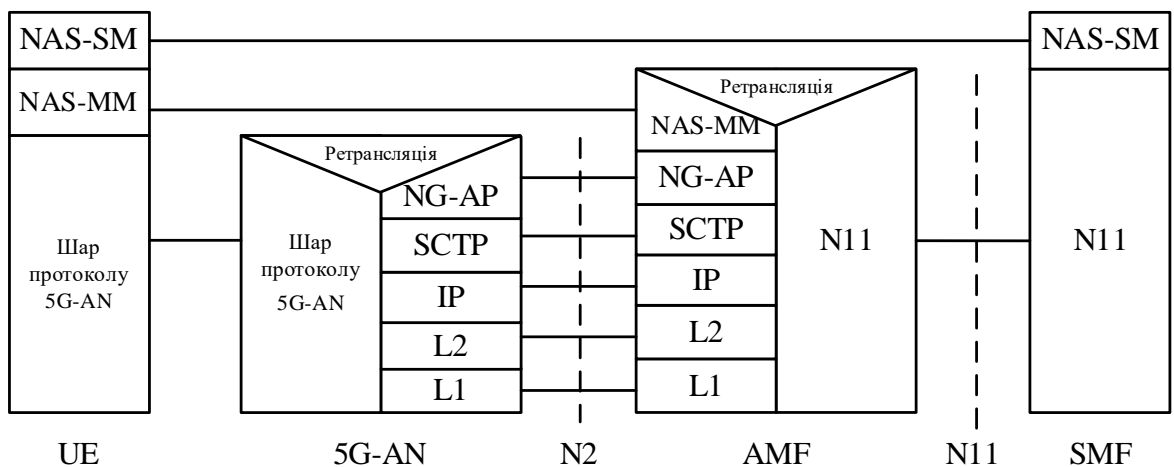


Рис. 1.2. Стек протоколів площини управління між UE, 5G-AN, AMF і SMF

NAS-SM підтримує керування сеансами (Session Management – SM) між UE та SMF. Підтримує створення, модифікацію та звільнення сеансів PDU на рівні користувача. Він передається через AMF і є прозорим для AMF. NAS-MM підтримує функції управління реєстрацією, управління з'єднанням і активацію та деактивацію з'єднання на рівні користувача. Він також відповідає за шифрування та захист

цілісності сигналізації NAS. У випадку NG-RAN, радіопротокол між UE і вузлом NG-RAN (eNodeB або gNodeB) визначається в E-UTRA і E-UTRAN. Протокол додатків NG-AP (Application Protocol – AP) це протокол прикладного рівня між вузлом 5G-AN і AMF. Протокол передачі управління потоком (Stream Control Transmission Protocol – SCTP) гарантує доставку сигнальних повідомлень між AMF і вузлом 5G-AN (N2).

Між 5G-AN і SMF також існує прямий зв'язок, який зазвичай називають інформацією N2 SM: це підмножина інформації NG-AP (не показана на рисунку), яку AMF прозора передає між 5G-AN і SMF, і яка включена в повідомлення NG-AP і пов'язані з ними повідомлення N11 [16].

5G визначає два основних діапазони частот (FR) [17]:

- FR1 охоплює частоти від 450 МГц до 7,125 ГГц (згідно з версією 16), підтримуючи пропускну здатність радіоканалу від 5 МГц до 100 МГц (див. Таблицю 1.1);
- FR2 охоплює частоти від 22,450 ГГц до 52,600 ГГц (також відповідно до версії 16), з шириною смуги радіоканалу від 50 МГц до 400 МГц (див. Таблицю 1.1).

Таблиця 1.1

Діапазони частот FR1 5G-NR

Діапазон	Частота (МГц)	Пропускна здатність (МГц)	Метод дуплексування
n77	3300-4200	10-100	TDD
n78	3300-3800	10-100	TDD
n79	4400-5000	40-100	TDD
n80	1710-1785	5-30	SUL
n81	880-915	5-20	SUL
n82	832-862	5-20	SUL
n83	703-748	5-20	SUL
n84	1920-1980	5-20	SUL
n86	1710-1780	5-40	SUL
n90	2496-2690	10-100	TDD

Управління якістю обслуговування в 5G має на меті забезпечити найвищу можливу якість обслуговування для кожного потоку даних. Як і в 4G, саме опорна мережа, а не мережа радіодоступу, управляє і розуміє вимоги до послуг. Функція

управління доступом і мобільністю (Access and Mobility Management Function – AMF) контролює якість обслуговування, в той час як NG-RAN не знає про конкретні послуги, які обробляються.

Коли ініціюється сеанс PDU, AMF встановлює правила QoS між радіовузлом і одним або декількома об'єктами UPF. Цей сеанс транспортує IP-потіки, кожен з яких потенційно вимагає різних рівнів QoS. Кожен окремий потік ідентифікується ідентифікатором потоку QoS, який пов'язаний з ідентифікатором QoS 5G (5G QoS Identifier – 5QI) і пріоритетом виділення і збереження (Allocation and Retention Priority – ARP). QFI є унікальним в межах певного сеансу PDU і може бути призначений або під час створення сеансу, або коли сеанс змінюється.

AMF визначає значення QFI під час налаштування сеансу, звертаючись до Єдиного сховища даних (UDR) для перевірки дозволених рівнів QoS користувача. Для виділених послуг функція управління сеансами (SMF) вибирає відповідні 5QI і ARP або зі своєї внутрішньої бази даних, або шляхом запиту до функції управління політикою (PCF).

5QI, параметр, стандартизований 3GPP, визначає такі характеристики, як:

- Максимально допустима затримка при передачі через мережу 5G;
- Рівень пріоритету;
- Допустимий рівень помилок;
- Тип послуги (з гарантованою швидкістю передачі або без неї – GBR (Guaranteed Bit Rate) або не-GBR).

Ця стандартизація забезпечує узгоджену обробку потоків даних як в ядрі 5G, так і в мережі NG-RAN. Для некритичних послуг значення 5QI (1-80) відображають значення QCI (QoS Class Identifier – Ідентифікатор класу QoS), що використовуються в 4G. Значення 81-85 є новими і використовуються для URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication – наднадійний зв'язок з низькою затримкою), де висока швидкість і низька затримка є критично важливими.

Значення ARP допомагає NG-RAN вирішити, чи дозволити або відхилити запит на налаштування носія під час перевантаження мережі [18].

QFI – це 6-бітне значення, а 5QI – від 1 до 85. Коли  $5QI \leq 64$ , він може мати те саме значення, що і QFI. В Таблиці 1.2 наведено характеристики QoS за типом послуги.

Таблиця 1.2

## Характеристики QoS 5G

5QI	Тип	PLER	Бюджет затримки пакетів	Пріоритет	Послуги
1	GBR	$10^{-2}$	100 мс	2	Потоковий голос
2		$10^{-3}$	150 мс	4	Потокове відео
3		$10^{-3}$	50 мс	3	Відеоігри в реальному часі, V2X-повідомлення
4		$10^{-6}$	300 мс	5	Непотокowe відео (буферизація)
65		$10^{-2}$	75 мс	0,7	Критичні до затримки голосові повідомлення
66		$10^{-2}$	100 мс	2	Некритичні до затримки голосові повідомлення
75		$10^{-2}$	50 мс	2,5	V2X-повідомлення
5		$10^{-6}$	100 мс	1	IMS-сигналізація
6	Без GBR	$10^{-6}$	300 мс	6	Голос, потокове відео, інтерактивні відеоігри
7		$10^{-3}$	100 мс	7	Відео (буферизація), TCP-послуги (Інтернет, електронна пошта, P2P і т.д.)
8		$10^{-6}$	300 мс	8	Відео (буферизація), TCP-послуги (Інтернет, електронна пошта, P2P і т.д.)
9		$10^{-6}$	300 мс	9	Відео (буферизація), TCP-послуги (Інтернет, електронна пошта, P2P і т.д.). Стандартна служба переносу
69		$10^{-6}$	60 мс	0,5	Критична до затримки сигналізація (напр. MC-PTT)
70		$10^{-6}$	200 мс	5,5	Критичні до затримки дані
79		$10^{-2}$	50 мс	6,5	V2X-повідомлення
80		$10^{-6}$	10 мс	6,8	eMBB-послуги з низькою затримкою; доповнена реальність
82	Критичний до затримки GBR	$10^{-4}$	10 мс	1,9	Дискретна автоматизація (малі пакети)
83		$10^{-4}$	10 мс	2,2	Дискретна автоматизація (великі пакети)
84		$10^{-5}$	30 мс	2,4	Розумні транспортні системи (ITS)
85		$10^{-5}$	5 мс	2,1	Розподіл електроенергії високої напруги

Коли мобільний пристрій перебуває в режимі RRC\_CONNECTED, дотримання правил QoS переходить до радіоінтерфейсу 5G NR. Весь трафік користувацького рівня



в межах сеансу PDU, який використовує одну і ту ж QFI, обробляється за тими ж правилами управління трафіком (наприклад, впорядкування пакетів, контроль допуску).

Радіовузол конфігурує одну або декілька несучих радіодоступу (Radio Access Bearer – RAB) і зіставляє QFI з цими несучими, використовуючи шаблон потоку трафіку (Traffic Flow Template – TFT).

Для трафіку висхідної лінії зв'язку використовуються два методи для управління тим, як QoS IP-потoku відображається на носії радіосигналу:

- Віддзеркалення QoS, коли пристрій відображає правила QoS низхідної лінії зв'язку за допомогою конфігурацій TFT;
- Явна конфігурація, коли QoS встановлюється безпосередньо через параметри радіопередавача.

У результаті проведеного аналізу визначено, що застосування БПЛА в якості базових станцій передбачає використання стандарту 5G. Визначено, що сигнали ВВЧ-діапазону вимагають передачі в межах прямої видимості між та характеризуються високим загасанням при передачі на далекі відстані із-за високого атмосферного поглинання та перешкод. Таким чином, модель телекомунікаційної системи потребує вдосконалення для врахування цих особливостей та вимог до QoS, що і є частковою задачею дослідження, що вирішуватиметься в наступних розділах.

## **1.2 Ключові показники ефективності аерокосмічних мереж**

У зв'язку зі стрімким зростом вимог до телекомунікаційних мереж існує необхідність їх постійного вдосконалення для забезпечення більшого покриття та кращої якості і надійності зв'язку. Нові технології, такі як Інтернет речей (Internet of Things – IoT), штучний інтелект та автоматизація потребують великої пропускної здатності і точності передачі даних. Висока швидкість передачі даних та низька затримка в мобільних мережах п'ятого покоління буде досягатись за рахунок більш високих частот від 30 до 300 ГГц. Для забезпечення більш надійного та об'ємного покриття мережі п'ятого покоління можуть бути інтегровані з аерокосмічними

мережами зв'язку [19]. Згідно з визначенням 3GPP, аерокосмічні мережі зв'язку це мережі або сегменти мереж, які використовують або безпілотні літальні апарати (БПЛА), які зазвичай працюють на висоті від 8 до 50 км, включаючи висотні платформи (High Altitude Platform – HAP), або супутники для розміщення релейного передавального обладнання або базової станції. Тобто АКМЗ не покладаються лише на наземну інфраструктуру мереж зв'язку, таку як наземні базові станції або оптичні кабелі. На додаток до цієї інфраструктури АКМЗ використовують багато технологій та платформ повітряного, космічного та підводного зв'язку [20].

Мережі АКМЗ не є новою технологією і існують вже багато років. Однак способи, якими вони можуть забезпечити зв'язок, постійно розвиваються. Традиційно мережі АКМЗ використовувалися для транзитного передавання даних між наземною мережевою інфраструктурою в ситуаціях, коли прокладання оптоволокна/кабелю є проблематичним. Зараз різниця полягає в тому, що АКМЗ розробляються для безпосереднього підключення до пристрою користувача. Поява низькоорбітальних супутників (Low Earth Orbit – LEO) зробила це можливим, оскільки супутники розташовуються на відносно низькій висоті, як правило, близько кількох сотень кілометрів над поверхнею Землі, забезпечуючи сильніший сигнал, який може досягти пристрою кінцевого користувача (UE) [21].

Основні елементи АКМЗ, представлені на Рисунку 1.3, це [22]:

- Супутниковий сегмент: одна з найбільш використовуваних форм АКМЗ – супутниковий зв'язок. Супутники, запуснені на геостаціонарні орбіти GEO (Geostationary Orbit), середньоорбітальні MEO (Middle Earth Orbit) або LEO-супутники можуть забезпечувати навіть широкосмуговий доступ до Інтернету, послуги зв'язку та передачі даних для віддалених місць та областей з недостатнім мережами.
- Висотні платформи/HAPS: це платформи, розташовані високо в небі за допомогою балонів з газом або дронів з живленням від сонячної енергії, що також можуть використовувати «атмосферний вітер» для зависання на великі проміжки часу. Вони можуть виконувати роль релейних станцій для мереж мобільного зв'язку та доступу до Інтернету.

- Повітряні платформи: Деякі рішення АКМЗ використовують дрони або інші безпілотні літальні апарати, що несуть обладнання зв'язку для створення тимчасових мереж зв'язку, особливо в місцях стихійного лиха, або під час інших ситуацій, коли традиційні мережі зв'язку недостатньо ефективні.

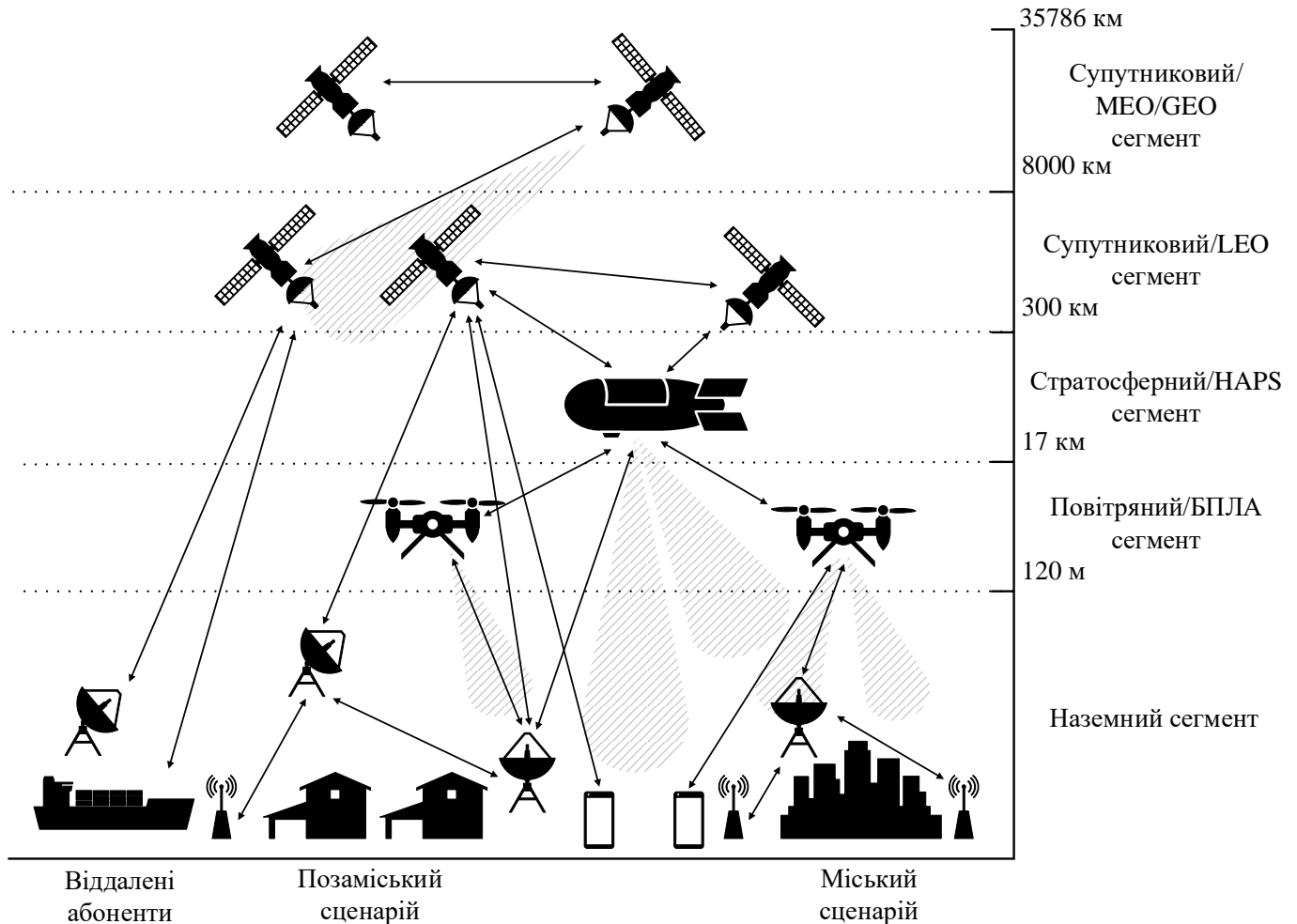


Рис. 1.3. Загальна концепція АКМЗ

Головні сценарії застосування, що розглядаються для АКМЗ-мереж, це:

- Надання послуг для місцевості, де наземна служба недоступна, а також для тих послуг, які можуть бути ефективніше підтримані через супутник, наприклад, багатоадресна передача/трансляція аналогічного контенту на велику площу з високою масштабованістю.
- Забезпечення найкращого покриття у менш густонаселених/сільських районах, на морі, на великій висоті/повітряних транспортних засобах, у

зонах стихійного лиха та кризових ситуацій, де наземні мережі не можуть працювати надійно.

- Зменшення вразливості/підвищення відмовостійкості аерокосмічних мереж.
- Зменшення витрат за рахунок загального радіоінтерфейсу для наземних та аерокосмічних мереж за рахунок економії масштабу та забезпечення безперервності послуг.

У аерокосмічних мереж зв'язку є ряд недоліків, серед яких:

- Антенні технології: антенні технології є для АКМЗ життєво важливими, оскільки саме від них залежить якість зв'язку та вартість таких рішень [23].
- Високі початкові інвестиції: створення та запуск супутників або розгортання висотних платформ можуть вимагати великих початкових витрат [24].
- Затримки: системи АКМЗ можуть мати високі затримки на передачу сигналу в порівнянні з суто наземними мережами, що може негативно впливати на роботу сервісів, критичних до затримки.
- Обмеження частотного спектру: супутникові та інші мережі АКМЗ працюють у виділених їм частотних діапазонах, які, проте, не безмежні. Тому в міру введення нових послуг можуть виникати обмеження спектру частот.
- «Космічне сміття» та насичення орбіт: для низькоорбітальних супутників LEO може виникати проблема забруднення орбіт «космічним сміттям» – уламками старих супутників, розгінних блоків ракет тощо. Використання LEO багатьма учасниками АКМЗ може лише погіршити цю проблему.
- Фактори погоди та умов довкілля: якість супутникового зв'язку може значною мірою залежати від погоди, наприклад, при сильному дощі або впливу атмосфери якість зв'язку може знижуватися [25].
- Регуляторні проблеми: робота АКМЗ часто потребує координації зусиль різних регуляторних органів та їх міжнародної координації.
- Взаємний вплив сигналів: сигнали від різних АКМЗ можуть іноді впливати один на одного, та інші наземні мережі, що іноді призводить до перешкод у зв'язку [26].

- Проблеми конфіденційності та безпеки: дані, що передаються через супутники, можуть бути схильні до перехоплення та втручання у зв'язок. Це досить серйозна проблема [27].
- Обмеження смуги пропускання на користувача: супутникові мережі досі не мають можливості надавати користувачеві таку саму широку смугу пропускання, як традиційні наземні мережі [28].
- Проблеми розгортання та обслуговування: АКМЗ можуть бути пов'язані з проблемами логістики, особливо у віддалених та малонаселених областях.
- Складнощі з хендовером: безперервний хендовер між наземними та аерокосмічними мережами може бути технічно складним, що може призводити до перерв у зв'язку, особливо якщо канал встановлюється через багато різних мереж.
- Енергоспоживання: деякі елементи АКМЗ, такі як дрони та атмосферні балони, можуть мати підвищене енергоспоживання, що може обмежувати термін їх роботи та збільшувати вартість обслуговування [29].

У зв'язку з цим виникає необхідність усунення або пом'якшення впливу цих недоліків, зокрема підвищення енергоефективності повітряних платформ та зменшення атмосферного впливу.

Аерокосмічні мережі зв'язку мають низку характеристик, які потребують адаптації при об'єднанні з телекомунікаційними мережами, включаючи:

- Рух космічних/повітряних апаратів: тільки для GEO супутник залишається досить стабільним над землею, як у наземних мережах. Для LEO і MEO супутники рухаються з високою швидкістю, що призводить до більш високих доплерівських зсувів та більш швидких змін затримки розповсюдження, що вимагає покращеного управління променем. На основі інформації про прогнозований рух супутника (ефемериди) і розташування/руху UE, супутникова мережа може знати, який промінь та супутник найкраще покривають UE. Оскільки рухомі стільники, можуть також перетинати кордони країн або покривати області без територіальних претензій, також необхідно враховувати нормативні аспекти [30].

- Висота: супутники працюють на набагато більших висотах, ніж наземні базові станції, що призводить до більшої затримки через великі затримки розповсюдження сигналу (наземні БС: зазвичай  $<1$  мс; GEO: до кількох 100 мс), а також впливає на бюджет лінії зв'язку, особливо в висхідному каналі, де потужність передачі UE обмежена [31].
- Розміри стільників: аерокосмічні мережі мають більші розміри стільників, ніж телекомунікаційні мережі, що може призвести до більш високих змін затримок розповсюдження та сильнішого впливу ефекту чутності.
- Тропосферні дії: актуальні на частотах вище 6 ГГц; як поглинання, особливо актуально для більш високих частот ( $>10$  ГГц) та низьких висот (тропосфера – і нижня частина атмосфери; нижче  $\sim 12$  км).
- Іоносферні впливи: актуальні на частотах нижче 6 ГГц, ефекти відбиття та поглинання (також залежність від широти); (іоносфера – верхня частина атмосфери, в якій сонячне випромінювання створює шари плазми через іонізацію; вище  $\sim 80$  км).

Хоча інтеграція антенних решіток безпосередньо в користувацькі термінали зазвичай неможлива через обмеження в розмірах і потужності, супутники і базові станції добре підходять для такої реалізації. У мобільному зв'язку формування променю відіграє вирішальну роль у зменшенні завад і підвищенні пропускної здатності системи за рахунок просторової ізоляції користувацьких передач.

Однак застосування формування променю в супутникових системах пов'язане з низкою проблем через унікальну природу супутникових платформ, включаючи питання, пов'язані з розміром, потужністю і орбітальною динамікою. Ці проблеми будуть розглянуті далі в наступних розділах.

Реалізація методів формування променю зазвичай залежить від знання інформації про стан каналу (Channel State Information – CSI) цільових користувачів, а іноді і користувачів, що заважають. Це важливо для таких методів, як формування променю з нульовим фокусуванням (Zero-Forcing – ZF) і регуляризованим нульовим фокусуванням (Regularized Zero-Forcing – RZF). Однак, на відміну від наземних

мереж, супутникові системи страждають від значних затримок зв'язку між супутниками і наземними користувачами через великі відстані [32].

Ці тривалі затримки ускладнюють отримання CSI в реальному часі, особливо в системах з FDD, які все ще широко застосовуються. Як наслідок, супутникові системи потребують спеціалізованих алгоритмів формування променя, які можуть обробляти застарілі або запізнілі CSI.

Одним з рішень є сліпе формування променя, яке не покладається на попередні знання про напрямок сигналу або передані сигнали. Це робить його придатним для ситуацій, коли CSI недоступна або дуже застаріла.

Крім того, через неоднорідну форму Землі та рух супутників затримка в отриманні CSI може змінюватися в часі. У TDMA-системах (Time Division Multiple Access – Множинний доступ з часовим розділенням каналів) ця мінливість вимагає використання точних механізмів контролю часу для підтримки надійної продуктивності та синхронізації.

У супутниковому зв'язку зв'язок між супутником і наземними користувачами, як правило, включає сильний прямий шлях, в результаті чого утворюється канал, який зазвичай моделюється або як AWGN-канал (Additive White Gaussian Noise – Адитивний білий гаусівський шум), або як канал Річарда, в якому домінує компонент прямої видимості (Line-of-Sight – LoS). Обидві моделі характеризуються мінімальною варіацією каналу, що означає, що умови каналу залишаються відносно стабільними з часом [33].

Однак, коли наземні користувачі розташовані близько один до одного, їхні реакції на канал мають тенденцію бути просторово подібними, що призводить до низької просторової ортогональності. Відсутність ортогональності ускладнює розділення сигналів користувачів за допомогою звичайних методів формування променя.

У таких сценаріях можна використовувати опортуністичне формування променя. Цей підхід навмисно вводить штучні і швидкі флуктуації каналу, посилюючи просторове розмаїття і дозволяючи ефективно розрізняти користувачів.

І навпаки, якщо наземні користувачі віддалені один від одного, їхні канали, природно, демонструють низьку кореляцію, що означає, що вони більш просторово відокремлені. Таке просторове розділення покращує ортогональність, дозволяючи традиційним методам формування променю ефективно ізолювати і обслуговувати декількох користувачів одночасно.

У телекомунікаційних мережах, незважаючи на широке розмаїття мобільних пристроїв і стандартів, загальна архітектура зв'язку залишається незмінною, що дозволяє використовувати єдині моделі формування променю для всіх користувачів і умов.

На відміну від геостаціонарних супутників, більшість інших супутників рухаються з великою швидкістю відносно поверхні Землі, особливо на низькій навколоземній орбіті. Наприклад, супутники в угрупованні Iridium, що обертаються на висоті приблизно 780 км, проходять орбіту приблизно за 100 хвилин, в результаті чого їхня кутова швидкість становить приблизно  $3,6^\circ$  за хвилину [34].

Через такий швидкий рух діаграма спрямованості супутника повинна постійно і швидко коригуватися, щоб відстежувати відносне положення наземних користувачів. Якщо користувач виходить з зони дії променю супутника, канал зв'язку переривається, що робить швидке і безперебійне перемикання між променями або супутниками необхідним для підтримки зв'язку [35].

У системах на LEO- і MEO-орбітах цей рух також призводить до значних доплерівських зсувів, які можуть серйозно вплинути на продуктивність, особливо у вузькосмугових системах зв'язку. Ці частотні зсуви можуть призвести до проблем з синхронізацією і спотворенням сигналу, якщо їх не вирішити належним чином. Для підтримки надійного зв'язку необхідні методи доплерівської компенсації, що забезпечують точне вирівнювання частоти і стабільний зв'язок, незважаючи на високі відносні швидкості між супутниками і користувачами. Проблема є аналогічною для повітряних безпілотних платформ із-за їх високої мобільності, система повинна бути адаптивною та враховувати непостійну швидкість БПЛА та їх можливість зависати в повітрі.



НАР – це стратосферні/висотні платформи, що розміщуються на висотах від 8 до 50 км. Мається на увазі, що НАР квазістаціонарні, тобто схожі на звичайну базову станцію, лише у повітрі. Грубо кажучи, для мобільного телефону, або користувацького обладнання (UE) за класифікацією 3GPP, така повітряна НАР-БС практично нічим не відрізняється від звичайної і з цією БС, теоретично, може працювати будь-який телефон з підтримкою 5G.

Для надання стабільних високоякісних послуг зв'язку недостатньо лише низьковисотних повітряних платформ, таких як дрони і літаки, чи космічних систем. Хоча дрони і літаки забезпечують безпосередню близькість до землі, їм не вистачає довготривалої стійкості і широкого покриття. І навпаки, супутники на низькій LEO-орбіті забезпечують глобальне покриття, але лише короточасний контакт з будь-яким місцем і обмежену близькість. Геостаціонарні супутники забезпечують постійне покриття на великих територіях, але їхня велика висота над рівнем моря знижує ефективність сигналу.

HAPS, що працюють у стратосфері, унікальним чином поєднують близькість, стійкість і покриття в одному рішенні. Ця можливість особливо цінна для зв'язку, де НАР може передавати широкосмуговий зв'язок безпосередньо на мобільні пристрої, а також для спостереження за Землею, де дані з високою роздільною здатністю є критично важливими для отримання дієвих висновків [36].

Концепція HAPS вивчається Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ) з середини 1990-х років, та прогрес, досягнутий в 2010-их роках у таких сферах як ефективність сонячних панелей, щільність енергії акумуляторів, легкі композитні матеріали, автономна авіоніка і антенні технології, значно підвищив реалістичність і продуктивність сучасних НАР-систем [37].

HAPS може функціонувати в двох основних архітектурних ролях АКМЗ:

- 1) HAPS в якості ретранслятора («bentpipe»), що діє як пасивний ретранслятор, передаючи сигнали між наземними станціями та користувачами з мінімальною обробкою. В такій ролі HAPS потребує менше енергоспоживання, але характеризується більшою затримкою для

абонентського обладнання через обробку на рівні MAC на наземних станціях.

- 2) Регенеративна HAPS (в якості БС) обробляє і регенерує сигнали на борту, функціонуючи аналогічно наземним базовим станціям з повним комплектом радіобладнання. Такий варіант архітектури краще оптимізований для незалежного проектування каналів доступу (Access Link – AL) і фідерних каналів (Feeder Link – FL), проте підвищує складність системи та вимоги до енергії.

HAPS підтримують передові технології АКМЗ і варіанти використання:

- В якості супермакробазових станцій (SMBS) транзитного зв'язку для підключення пристроїв IoT в сільській місцевості або в районах з недостатнім рівнем обслуговування.
- Ліквідація наслідків стихійних лих та аварійних ситуацій: Швидке розгортання робить HAPS ідеальним рішенням для тимчасового або екстреного покриття.
- Підтримка MISO/NOMA, БПЛА, оснащених RIS, та сценаріїв з обмеженими апаратними можливостями для підвищення пропускну здатності та ефективності використання спектру.

HAPS покращують продуктивність системи, збільшуючи радіус дії до 500 км на одну HAP, з потенціалом глобального покриття за допомогою декількох апаратів, порівняно з супутниками на LEO-орбіті, HAPS зменшують затримку на 30-40 мс, покращують енергоефективність при використанні регенеративної архітектури з оптимізацією коефіцієнта споживання та підвищують спектральну ефективність завдяки вдосконаленій модуляції, формуванню променю і плануванню трафіку.

Серед недоліків HAPS можна відзначити фідерні лінії (від землі до HAPS) і лінії доступу (від HAPS до користувачів), що зазнають великих втрат у вільному просторі, особливо на відстанях до 50 км і більше. Радіочастотні лінії зв'язку від HAPS до наземних користувачів повинні долати обмежену потужність пристроїв користувачів і низький коефіцієнт підсилення антени (наприклад, для мобільних IoT-пристроїв), що зменшує покриття висхідної лінії зв'язку. Втрати сигналу погіршуються в «bent-pipe»-

архітектурах, де якість сигналу погіршується через багаторазове посилення і додавання шуму. Затримка в таких архітектурах вища, оскільки МАС і обробка на вищих рівнях базуються на землі [38]. Безперешкодна інтеграція з наземними та супутниковими сегментами є нетривіальною і пов'язана з певними проблемами:

- Управління хендовером;
- Часова синхронізація;
- Підтримка адаптивних протоколів.

Обмеження щодо обладнання та корисного навантаження також є важливим фактором. HAPS повинні нести легке, енергоефективне корисне навантаження. Повноцінні базові станції або регенеративні конструкції вимагають більшої потужності і охолодження, ніж ретранслятори з гнучкими трубами. Що стосується енергопостачання, то типовим є використання сонячної енергії, але зберігання енергії і управління нею для безперервної роботи вночі або в хмарних умовах залишаються складними завданнями. Обмежені можливості бортової обробки можуть обмежувати адаптацію в режимі реального часу або оптимізацію на основі ШІ в регенеративних HAPS.

Перешкоди і управління спектром також є серйозною проблемою в системах з підтримкою HAPS, оскільки HAPS можуть працювати в загальних частотних діапазонах (наприклад, LTE Band 1), створюючи ризик втручання в наземні мережі. Координація передач між HAP і наземним сегментом вимагає вдосконаленого частотного планування і формування променя, щоб мінімізувати перешкоди в багатостільникових системах.

Що стосується питань регулювання і розгортання, то розгортання HAPS вимагатиме регулювання повітряного простору з авіаційною владою і координації з цивільними літаками. Запуск, позиціонування і довгострокове обслуговування все ще складніші, ніж наземних базових станцій. Для національного або глобального покриття може знадобитися велика кількість HAPS. Крім того, високі початкові витрати на дослідження і розгортання можуть обмежити впровадження, незважаючи на довгострокові економічні переваги над супутниками [40].

У регенеративній архітектурі HAPS виконують всі функції базової станції (наприклад, радіостанції (Radio Unit – RU), DU або блоку базового діапазону (Baseband Unit – BBU)) на борту повітряної платформи. HAP-БС, що використовує LTE Band 1 (DL на 2,1 ГГц) з направленими антенами, досягла хорошої спектральної ефективності низхідної лінії зв'язку як в одностільникових, так і в 7-стільникових конфігураціях. У той же час, покриття висхідної лінії зв'язку було значно обмежене потужністю передачі UE, що частково вирішувалося за допомогою спрямованих антен на UE. Гексагональна антенна решітка на HAPS дозволила покрити 7 стільників за рахунок формування променя. У Таблиці 1.3 вказані переваги та недоліки HAP-БС у порівнянні зі звичайною телекомунікаційною мережею 5G.

Таблиця 1.3

## Порівняння HAPS та наземної базової станції 5G

Показник	Регенеративна HAP-БС	Наземна 5G-БС
Радіус покриття	~200-500 км (LoS)	~1-10 км (міський сценарій), ~20–30 км (сільський сценарій)
Затримка	~1-2 мс (розповсюдження) + затримка обробки	~1-5 мс (типовий)
Пропускна здатність низхідного каналу	Від середньої до високої (можлива швидкість до 1 Гбіт/с на користувача)	Дуже висока (можлива швидкість у декілька Гбіт/с на користувача)
Пропускна здатність висхідного каналу	Обмежується коефіцієнтом посилення антени та потужністю UE	Висока (оптимізовані радіочастотні канали)
Час розгортання	Швидкий (~дні)	Тривалий (від декількох тижнів до декількох місяців для інфраструктури)
Джерело енергії	Сонячна енергія (обмежена), батареї	Живлення від електромережі (необмежене)
Управління перешкодами	Простіше в сільській місцевості (менше джерел перешкод поблизу)	Складне в міських/густонаселених районах
Підтримка мобільності	Добра, але хендовер та відстеження променя ускладнені	Оптимізовані та перевірені часом протоколи мобільності
Експлуатаційні витрати	Помірні (дешевше за супутникові, дорожчі за наземні БС)	Різні (низькі в міських районах, високі в сільських)

HAP-БС забезпечують широке покриття з низькою затримкою і гнучке розгортання, що робить їх ідеальним рішенням для сільського/віддаленого доступу і

сценаріїв АКМЗ. Однак у щільній міській забудові наземні 5G БС залишаються кращими за пропускну здатністю, продуктивністю висхідної лінії зв'язку та енергоефективністю. Відповідно до порівняння, НАР-БС явно не призначені для заміни міських наземних мереж 5G, виконуючи наступні ролі:

- Подовження транзитного зв'язку у віддалених/сільських районах;
- Аварійне/тимчасове покриття;
- Накладні мережі в місцях проведення масштабних заходів або в морських зонах;
- Додаткові АКМЗ-компоненти поряд із супутниками та БПЛА.

Коли мова йде про зв'язок між НАPS, ця можливість є дуже важливою:

- Розширення магістрального покриття АКМЗ на великих територіях;
- Формування багатохопових мереж;
- Передача даних від наземних станцій у віддалені регіони без наземної інфраструктури.

Найкращою технологією для зв'язку між НАPS є FSO, що забезпечує високу швидкість передачі даних (на рівні Гбіт/с), безпечну вузькопроменеву передачу і неліцензійний спектр. Вона є дуже привабливою завдяки низькій атмосферній турбулентності на висоті 20 км, прямій видимості (LoS) між платформами і мінімальним погодним перешкодам на висоті роботи НАPS (над хмарами та дощем).

Проведений аналіз засвідчив, що інтеграція БПЛА-БС та НАPS вимагає усунення або пом'якшення недоліків АКМЗ-мереж, зокрема підвищення енергоефективності повітряних платформ, зменшення атмосферного впливу та завмирання сигналу, що визначено частковою задачею дослідження.

### **1.3 Аналіз взаємодії вузлів телекомунікаційних мереж на основі повітряних платформ**

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – це літальні апарати, що керуються дистанційно або за допомогою бортових комп'ютерних систем, без участі людини-пілота на борту. Розроблені для військових цілей, БПЛА в основному

використовувалися в небезпечних умовах для розвідувальних і бойових місій, допомагаючи мінімізувати ризик для людей-пілотів [36].

В останні роки розвиток технологій виробництва БПЛА і зниження собівартості значно розширили доступ громадськості до цих систем, що призвело до різкого зростання їх цивільного і комерційного застосування. Сьогодні БПЛА використовуються в широкому спектрі галузей, включаючи повітряну інспекцію, фотографування, точне землеробство, моніторинг дорожнього руху, реагування на надзвичайні ситуації, логістику і телекомунікації. В результаті БПЛА стали ключовою технологією, що розвивається, і пропонують значний бізнес-потенціал на найближче десятиліття.

Зважаючи на різноманітність сфер застосування, БПЛА бувають різних форм і можуть бути класифіковані за кількома критеріями, такими як призначення, вага, розмір, тривалість польоту, тип крила, метод керування, дальність польоту, висота, швидкість і джерело живлення.

Одна з найпоширеніших класифікацій базується на конфігурації крила [41]:

- БПЛА з фіксованим крилом зазвичай мають вищу швидкість, більшу вантажопідйомність і довшу тривалість польоту. Однак вони потребують злітно-посадкових смуг або систем запуску і не можуть зависати на місці;
- Гвинтокрилі БПЛА, навпаки, можуть злітати і приземлятися вертикально і зависати на місці, що робить їх придатними для виконання завдань, які вимагають стаціонарного польоту.

Ці відмінності роблять кожен тип БПЛА більш придатним для конкретних оперативних сценаріїв. Інший широко використовуваний підхід до класифікації базується на розмірі БПЛА. Зрештою, вибір відповідного типу БПЛА залежить від відповідності його технічних характеристик вимогам запланованої місії, що забезпечить як ефективність, так і результативність [42].

Завдяки постійному зниженню собівартості виробництва БПЛА і прогресу в мініатюризації комунікаційного обладнання, стає все більш практичним оснащення БПЛА легкими базовими станціями або ретрансляторами, створюючи повітряні платформи, які можуть підтримувати наземні безпроводові мережі. Наприклад, зараз

доступні комерційні базові станції LTE вагою до 4 кг, які можна встановлювати на БПЛА з помірним корисним навантаженням [43].

У порівнянні з традиційними безпроводовими системами, які покладаються на стаціонарні БС або ретранслятори на фіксованих позиціях, зв'язок за допомогою БПЛА пропонує кілька ключових переваг. По-перше, БС/ретранслятори, встановлені на БПЛА, можуть бути швидко розгорнуті, коли і де це необхідно, що робить їх ідеальними для таких ситуацій, як реагування на надзвичайні ситуації, особливі події або відновлення після катастроф. По-друге, БПЛА, що працюють на великій висоті, мають більше шансів підтримувати зв'язок з користувачами на землі в межах LoS, що забезпечує стабільніший і ефективніший зв'язок і кращу багатокористувацьку координацію. Нарешті, висока мобільність і можливості 3D-позиціонування БПЛА забезпечують додатковий рівень адаптивності, дозволяючи динамічно змінювати їхнє розміщення для оптимізації зв'язку відповідно до мінливих потреб наземної мережі.

У безпроводових мережах 5G трьома основними комерційними сценаріями використання є розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (enhanced Mobile Broadband – eMBB), масовий зв'язок машинного типу (massive Machine-Type Communication – mMTC) і URLLC – також відомий як зв'язок для критично важливих місій. Ці сценарії добре узгоджуються з комунікаційними потребами БПЛА. Зокрема, eMBB забезпечує високошвидкісну і надійну передачу даних, включаючи підтримку користувачів на межі стільника; mMTC з'єднує велику кількість IoT-пристроїв, які передають невеликі пакети даних з перервами; а URLLC призначений для високонадійного зв'язку з низькою затримкою за участю невеликих корисних навантажень, які зазвичай запускаються зовнішніми подіями, такими як аварійні тривоги. З огляду на ці вимоги, гнучкість і мобільність зв'язку за допомогою БПЛА робить його цінним рішенням для підтримки цих ключових послуг 5G, особливо в умовах, коли трафік даних стає все більш складним і динамічним [44].

Інтеграція БПЛА до мереж мобільного зв'язку, як повітряних користувачів або як платформ мобільного зв'язку, відкриває нові можливості, але водночас створює низку викликів. На відміну від традиційного наземного зв'язку, на системи з інтеграцією БПЛА впливають такі фактори, як велика висота і мобільність БПЛА,

часта наявність LoS-зв'язку між БПЛА і наземними вузлами, різні вимоги до QoS з боку CNPC і критично важливих даних корисного навантаження, суворі обмеження на розмір, вагу і потужність БПЛА, а також додаткова гнучкість проєктування, що пропонується завдяки поєднанню мобільності БПЛА з управлінням ресурсами зв'язку [45].

*Велика висота.* Базові станції або користувачі БПЛА працюють на значно більших висотах, ніж їхні наземні аналоги. У той час як традиційні базові станції зазвичай встановлюються на висоті близько 10 метрів у міському мікросередовищі (Urban Micro – UMi) і 25 метрів у міському макросередовищі (Urban Macro – UMa), БПЛА наразі дозволено літати на висоті до 120 метрів [46]. Для підтримки БПЛА стільникові мережі повинні забезпечувати тривимірне повітряне покриття, на відміну від традиційного двомірного покриття, призначеного для наземних користувачів. Однак існуючі антени базових станцій зазвичай нахилені вниз для оптимізації наземного покриття і зменшення перешкод, що обмежує їхню здатність обслуговувати повітряних користувачів.

*Висока ймовірність втрати зв'язку.* Високе положення БПЛА призводить до відмінної поведінки каналу «повітря-земля» у порівнянні зі стандартним наземним зв'язком. У той час як наземні канали зазвичай страждають від значних втрат, викликаних перешкодами і багатопроменевими завмираннями, канали БПЛА-земля (наприклад, між БПЛА і базовими станціями або БПЛА і наземними користувачами) зазвичай мають мінімальне розсіювання і з високою ймовірністю підтримують міцне з'єднання LoS [40]. Ця важлива особливість LoS створює як переваги, так і виклики для проєктування систем зв'язку БПЛА.

З позитивного боку, міцніші зв'язки LoS призводять до більш надійного зв'язку між БПЛА і наземними станціями або користувачами, а також забезпечують більшу макророзмаїтність, дозволяючи БПЛА гнучкіше обирати партнерів по зв'язку. Крім того, оскільки канали LoS менше змінюються в часі і частоті, такі завдання, як розподіл ресурсів і планування, можуть виконуватися рідше і ефективніше, ніж в наземних каналах, що швидко затухають.



Однак те ж саме домінування LoS також посилює завади, що стає головною проблемою в середовищах, де повітряні і наземні користувачі або базові станції працюють разом. Наприклад, БПЛА, що передає сигнали висхідної лінії зв'язку, може створювати перешкоди багатьом сусіднім стільникам, які використовують той самий спектр, через сильні LoS-потоки до їхніх базових станцій. Аналогічно, у низхідній лінії зв'язку на БПЛА можуть сильно впливати перешкоди від наземних базових станцій, що працюють в одному каналі. Ефективне управління перешкодами є важливим як для БПЛА, підключених до стільникових мереж, так і для тих, що підтримують наземний зв'язок [47].

Крім того, LoS-канали роблять системи зв'язку БПЛА більш вразливими до атак на фізичному рівні, таких як глушіння або підслуховування з боку зловмисних наземних суб'єктів, порівняно з наземними системами, які користуються захисними ефектами завмирання.

*Висока тривимірна мобільність.* На відміну від традиційних наземних мереж, де базові станції і ретранслятори стаціонарні, а мобільність користувачів зазвичай повільна і випадкова, БПЛА можуть швидко переміщатися в тривимірному просторі з частково або повністю контрольованим рухом. Така висока мобільність створює як виклики, так і можливості [48]. З одного боку, вона збільшує ймовірність частих переадресацій і призводить до того, що безпроводові канали зв'язку з наземними базовими станціями або користувачами динамічно змінюються в часі. З іншого боку, це уможливлює нову стратегію проектування: управління мобільністю БПЛА з урахуванням зв'язку. За такого підходу БПЛА можуть коригувати своє положення, висоту, швидкість і напрямок польоту в реальному часі для кращого виконання завдань зв'язку.

БПЛА з базовими станціями або ретрансляторами можуть планувати свої маршрути польоту, як заздалегідь так і динамічно, на основі позицій і стану каналів зв'язку користувачів, яких вони обслуговують. Аналогічно, БПЛА, які підключаються до стільникової мережі, можуть змінювати свої траєкторії, враховуючи розташування наземних базових станцій, забезпечуючи оптимальне покриття і безперебійне обслуговування протягом усієї місії. Крім того, тривимірне планування траєкторії

БПЛА може бути оптимізоване разом з плануванням зв'язку і управлінням ресурсами для подальшого підвищення продуктивності системи.

*SWAP-обмеження.* На відміну від наземних систем зв'язку, де базові станції і користувачі зазвичай мають стабільне живлення від електромережі або акумуляторних батарей, БПЛА підпадають під суворі обмеження щодо розмірів, ваги і потужності (SWAP), які суттєво впливають на їхню експлуатаційну витривалість і продуктивність зв'язку. Для безпроводового зв'язку з інтеграцією БПЛА це означає, що базові станції або ретранслятори, встановлені на БПЛА, повинні бути спеціально спроектовані так, щоб бути меншими, легшими, оснащеними компактними антенами і енергоефективним обладнанням, щоб відповідати обмеженим можливостям корисного навантаження і фізичним розмірам БПЛА [38].

На додаток до стандартних потреб в енергії для роботи приймачів зв'язку, БПЛА також повинні споживати значну кількість енергії для роботи двигунів, щоб залишатися в повітрі і маневрувати в тривимірному просторі. Ця енергія зазвичай значно перевищує енергію, що використовується для зв'язку – часто вона вимірюється в кіловатах, а не просто у ватах. Як наслідок, проектування енергоефективних систем зв'язку для БПЛА набагато складніше, ніж традиційних наземних мереж, де зазвичай враховується лише енергія зв'язку [43].

Безпроводовий зв'язок є фундаментальним компонентом в роботі безпілотних авіаційних систем. Він дозволяє БПЛА безпечно і ефективно функціонувати в складних умовах.

Існують дві основні категорії БПЛА-зв'язку:

- 1) Контроль і зв'язок безпілотних літальних апаратів (Control and Non-Payload Communication – CNPC). Це передбачає обмін критично важливою для безпеки інформацією між БПЛА і зовнішніми об'єктами, такими як віддалені пілоти, інші БПЛА, що знаходяться поблизу, і системи управління повітряним рухом. CNPC гарантує, що польоти БПЛА залишаються безпечними, надійними і ефективними, підтримуючи такі важливі функції, як навігація, уникнення зіткнень і координація;

- 2) Зв'язок з корисним навантаженням. Виходячи з цілей своєї місії, БПЛА часто повинні надсилати або отримувати специфічні дані – наприклад, аерофотознімки, відео в реальному часі або ретрансльовані пакети даних. Ця інформація може передаватися наземним операторам, користувачам або шлюзовим вузлам, або від них, залежно від виконуваного завдання.

Кожен тип зв'язку накладає унікальні вимоги до спектру і зв'язку, наведені в Таблиці 1.4, що робить надійні і ефективні безпроводові технології важливими для забезпечення цілісності управління і успіху місії.

Таблиця 1.4

## Вимоги до БПЛА-зв'язку відповідно до 3GPP TR 36.777

Канал зв'язку	Тип даних	Швидкість передачі даних	Надійність	Затримка
Низхідна лінія зв'язку («земля-БПЛА»)	Управління та контроль	60-100 кбіт/с	Коефіцієнт помилок пакетів $10^{-3}$	50 мс
Висхідна лінія зв'язку («БПЛА-земля»)	Управління та контроль	60-100 кбіт/с	Коефіцієнт помилок пакетів $10^{-3}$	Н/Д
	Дані	До 50 Мбіт/с	Н/Д	На рівні наземного користувача

Встановлення надійних і безпечних CNPC-каналів має важливе значення для масштабованого розгортання і безпечної експлуатації БПЛА [38]. Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ) визначив три ключові типи зв'язку CNPC, необхідні для забезпечення безпеки польотів БПЛА:

- 1) Командно-контрольний зв'язок: Сюди входять телеметричні дані (наприклад, статус польоту), що надсилаються з БПЛА наземному оператору, команди управління в режимі реального часу для неавтономних БПЛА і оновлення маршрутних точок для (напіваавтономних) БПЛА;
- 2) Вузловий зв'язок для управління повітряним рухом (Air Traffic Control – АТС): Для запобігання перешкод для пілотованих літаків, особливо в повітряному просторі з високим рівнем трафіку, БПЛА повинні передавати

дані управління повітряним рухом між центром управління і наземною станцією;

- 3) Зв'язок «виявлення та ухилення» гарантує, що БПЛА підтримують безпечну відстань від інших літальних апаратів, місцевості і перешкод за допомогою ситуаційної обізнаності в реальному часі.

CNPC і зв'язок з корисним навантаженням мають різні вимоги до зв'язку і спектру. Відповідно до стандартів 3GPP, CNPC зазвичай вимагає низької швидкості передачі даних (наприклад, 60-100 кбіт/с для висхідної і низхідної лінії зв'язку), але повинна мати високу надійність (частота помилок пакетів  $<10^{-3}$ ) і низьку затримку ( $<50$  мс) [39]. Ці вимоги в основному однакові для всіх типів БПЛА, оскільки вони є критично важливими для безпеки.

З іншого боку, вимоги до зв'язку з корисним навантаженням залежать від застосування. Наприклад:

- Потокова передача відео у форматі FHD вимагає декількох Мбіт/с;
- Передача відео в роздільній здатності 4K перевищує 30 Мбіт/с;
- Операції пересилання даних або транзиту можуть досягати десятків Гбіт/с.

Оскільки втрата зв'язку CNPC може мати катастрофічні наслідки, Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) вимагає, щоб такий зв'язок працював у захищеному авіаційному спектрі. Дослідження МСЕ показують, що близько 34 МГц наземного спектра і 56 МГц супутникового спектра необхідні для підтримки операцій з використанням БПЛА як в режимі LoS, так і поза ним [40].

Щоб задовольнити цю вимогу:

- На WRC-12 для CNPC БПЛА був виділений С-діапазон (5030-5091 МГц);
- Використання WRC-15 дозволило застосування геостаціонарної FSS (Fixed-Satellite Service – Супутникова служба зв'язку) для CNPC-зв'язку.

Для підтримки зв'язку як з CNPC, так і з корисним навантаженням в широкому спектрі застосувань БПЛА, мережа повинна забезпечувати безперебійний зв'язок «повітря-повітря» і «повітря-земля» в 3D-просторі. Чотири потенційні технології зв'язку порівнюються в Таблиці 1.5:

- Direct link (прямий зв'язок);

- Супутниковий зв'язок;
- Ad-hoc мережі;
- Стільникові мережі.

Кожен варіант пропонує різні компроміси щодо затримки, покриття, пропускної здатності та надійності, що робить правильний вибір критично важливим, виходячи з вимог місії.

Прямий зв'язок «точка-точка» між БПЛА та наземним вузлом (джойстиком, дистанційним контролером або наземною станцією) у неліцензованих частотних діапазонах, таких як діапазон 2,4 ГГц ISM, є простим і дешевим підходом. Однак цей метод значною мірою залежить від прямої видимості (LoS), що значно обмежує його дальність і ефективність у складних умовах, таких як міські райони, де перешкоди, такі як будівлі і дерева, можуть блокувати сигнали, що призводить до ненадійного з'єднання і низької швидкості передачі даних [49]. Крім того, таке базове налаштування, як правило, є незахищеним і схильним до перешкод або глушіння, що робить його непридатним для масштабування до великих мереж БПЛА в майбутньому [50].

Таблиця 1.5

## Порівняння безпроводових технологій для БПЛА-зв'язку

Технологія	Опис	Переваги	Недоліки
Direct Link	Прямий зв'язок типу «точка-точка» з наземним вузлом	Проста, недорога в експлуатації	Обмежений діапазон, низька швидкість передачі даних, вразливість до перешкод, відсутня масштабованість.
Супутниковий зв'язок	Зв'язок та доступ до Інтернету через супутник	Глобальне покриття	Дороге, важке/габаритне/енергоємне комунікаційне обладнання, висока затримка, велике ослаблення сигналу.
Динамічні (Ad-Hoc) мережі	Динамічно самоорганізована мережа без інфраструктури	Надійна та адаптивна, підтримка високої мобільності	Дорогі в експлуатації, низька ефективність спектру, переривчасте з'єднання, складний протокол маршрутизації.
Стільникові мережі	Забезпечення зв'язку БПЛА за допомогою стільникової інфраструктури та технологій	Практично повсюдна доступність, економічність, чудова продуктивність та масштабованість	Недоступність у віддалених районах, потенційні перешкоди з наземними зв'язком.

Як альтернатива, супутниковий зв'язок пропонує перспективне рішення завдяки своєму глобальному покриттю. Супутники можуть передавати інформацію між БПЛА і віддаленими наземними шлюзами, що особливо цінно у віддалених або морських регіонах, де відсутнє покриття наземних мереж. Супутники також підтримують навігацію і позиціонування БПЛА. Регуляторні зміни, такі як WRC-15, дозволили умовне використання частот діапазону Ku/Ka для зв'язку БПЛА з супутником, і такі компанії, як Inmarsat, почали пропонувати послуги супутникового зв'язку для БПЛА. Проте супутниковий зв'язок має суттєві обмеження: великі відстані призводять до високої затримки і втрат сигналу, що ускладнює задоволення суворих вимог CNPC до надійності і низької затримки. Крім того, БПЛА часто стикаються з обмеженнями за розміром, вагою і потужністю (Size, Weight, and Power – SWaP), що робить недоцільним перевезення громіздкого, енергоємного супутникового обладнання. Нарешті, високі витрати на супутниковий зв'язок обмежують його застосування для масового розгортання великомасштабних БПЛА [48].

Мобільна Ad-Hoc мережа (Mobile Ad-Hoc Network – MANET) використовує безпроводові стандарти з обмеженою пропускнуою здатністю, такі як IEEE 802.11 a/b/g/n, для зв'язку між пристроями, які можуть вільно переміщатися, що спричиняє часті зміни якості зв'язку. Коли потрібен зв'язок між пристроями, що знаходяться на великій відстані один від одного, проміжні вузли повинні діяти як ретранслятори, використовуючи багатохопову передачу, що призводить до більшого споживання енергії, зниження ефективності використання спектру і збільшення затримок.

Двома ключовими розширеннями MANET є транспортні спеціальні мережі (Vehicular Ad-Hoc Networks, VANET) для мобільних транспортних засобів і літаючі динамічні/«Ad-Hoc» мережі (Flying Ad-Hoc Network, FANET) для БПЛА, що працюють у 2D і 3D просторах відповідно [51]. Хоча FANET пропонують надійність і гнучкість для невеликих систем зв'язку БПЛА, вони не дуже добре підходять для широкомасштабного розгортання. Це головним чином пов'язано з проблемами створення надійних протоколів маршрутизації в мережах з часто мінливими і нестабільними з'єднаннями між високомобільними БПЛА.

Завдяки майже глобальному покриттю, високошвидкісному оптичному транспортуванню і розширеним можливостям зв'язку сучасні стільникові мережі потенційно можуть задовольнити потреби як у зв'язку з CNPC, так і в передачі даних корисного навантаження для БПЛА – незалежно від того, скільки БПЛА розгорнуто або як далеко вони знаходяться від наземних станцій. Наприклад, мережі 5G, які, як очікується, забезпечать пікову швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с і затримку до 1 мілісекунди, добре підходять для випадків використання БПЛА, що вимагають високої пропускної здатності і низької затримки, таких як передача відео в реальному часі і ретрансляція даних [52].

Хоча зв'язок БПЛА на основі стільникового зв'язку має багато переваг, все ще існують ситуації, коли стільниковий зв'язок недоступний, наприклад, у віддалених регіонах, таких як океани, пустелі або ліси. У таких випадках для підтримки зв'язку БПЛА за межами покриття наземної мережі можуть використовуватися альтернативні технології – в тому числі прямий зв'язок «точка-точка», супутниковий зв'язок і FANET.

Описані в Таблиці 1.5 технології не підходять для підтримки зв'язку між великою кількістю БПЛА в економічно ефективний спосіб. Використання супутникових систем для магістрального зв'язку між БПЛА не є оптимальним із-за високої затримки, та слабкого сигналу, що характеризується низьким SINR. Direct Link вимагає більшого енергоспоживання на борту БПЛА для роботи ніж інші підходи та має обмежену пропускну здатність. Ad-hoc мережа також є неенергоефективним рішенням, і як і Direct Link відзначається низькою масштабованістю. Застосування стільникових мереж для магістрального зв'язку між БПЛА вимагає виділення частини спектру для обслуговування БПЛА замість UE. Окрім цього, антени БС в більшості випадків спрямовані до землі для забезпечення кращої якості обслуговування наземних користувачів. Як наслідок, зростає інтерес до використання HAPS для забезпечення зв'язку між БПЛА.

HAPS є збалансованим рішенням між супутниковими системами за рахунок використання все ще виділеної магістральної лінії зв'язку і меншої відстані між БПЛА-вузлами і HAPS в ролі магістральних вузлів, та стільниковими системами, із-

за використання замість стаціонарних базових станцій квазістаціонарної HAPS, що виключає необхідність врахування високої мобільності супутників на низькій навколоземній орбіті. Таке рішення поєднує нижчу затримку передачі і краще відношення сигнал/шум між вузлами в порівнянні з супутниковими системами, спрощення протоколу маршрутизації за рахунок виключення з рівняння мобільності магістральних вузлів та можливість подвійного застосування HAPS в якості центру хмарних обчислень для рішень по координації мобільності БПЛА, при цьому не займаючи спектр, призначений для обслуговування абонентського обладнання. Таким чином, CNPC-зв'язок між БПЛА та HAPS відповідатиме вимогам до пропускну здатності в 60-100 кбіт/с та затримки в 50 мс, визначеним специфікаціями 3GPP до зв'язку управління та контролю БПЛА.

Таким чином, в результаті аналізу сучасних тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж та факторів, які знижують якість їх функціонування в умовах невизначеності, в першому розділі визначено, що застосування БПЛА в якості базових станцій передбачає використання стандарту 5G. Визначено, що сигнали ВВЧ-діапазону вимагають передачі в межах прямої видимості між та характеризуються високим загасанням при передачі на далекі відстані із-за високого атмосферного поглинання та перешкод.

Задачами дослідження визначено вдосконалення моделі каналу зв'язку телекомунікаційної системи з використанням повітряних безпілотних платформ для врахування особливостей ВВЧ-діапазону та вимог до QoS; розробка функціонально-структурної моделі інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі для підвищення енергоефективності повітряних платформ, зменшення атмосферного впливу та завмирання сигналу.

## **Висновки до розділу 1**

В розділі проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж і факторів, які знижують якість їх функціонування в умовах невизначеності та огляд архітектури мереж п'ятого покоління (5G), який засвідчив, що їх ключовими



перевагами є підвищена пропускна здатність, зменшена затримка, розширена щільність підключень та можливість адаптивної роботи в умовах різних типів трафіку. Визначено особливості архітектури NSA та SA, охарактеризовано функції основних мережових елементів, а також окреслено нові підходи до забезпечення якості обслуговування (QoS) та управління ресурсами.

Визначено ключові показники ефективності аерокосмічних мереж зв'язку (АКМЗ), що дало змогу встановити їхню роль у забезпеченні глобального покриття та підвищенні надійності телекомунікаційної інфраструктури. Розглянуто супутникові системи на різних орбітах (LEO, MEO, GEO), висотні платформи (HAP), безпілотні літальні апарати та інші технології. Визначено переваги АКМЗ, серед яких – забезпечення зв'язку у віддалених і важкодоступних регіонах, підтримка IoT-рішень, можливість розвантаження перевантажених наземних мереж та гарантування стійкості у надзвичайних ситуаціях. Окреслено також низку обмежень АКМЗ, що пов'язані з технічними, регуляторними та економічними чинниками, зокрема високою вартістю розгортання, затримками сигналу, обмеженістю спектру, проблемами хендоверу та безпеки.

Проведено аналіз взаємодії вузлів телекомунікаційних мереж на основі повітряних платформ, визначено, що для більш тривалої та ефективної роботи безпілотних повітряних платформ найкращим рішенням є використання HAPS в якості магістрального вузла за рахунок спрощення маршрутизації та виділеної лінії зв'язку між вузлами та виконання БПЛА-БС ролі в якості «bentpipe»-ретранслятора. Саме таке поєднання здатне забезпечити глобальне покриття, високі показники якості обслуговування та задоволення вимог користувачів і сервісів в умовах невизначеності. Отримані результати створюють підґрунтя для подальших досліджень у наступних розділах дисертаційної роботи, спрямованих на удосконалення методів побудови та управління інтегрованими наземно-аерокосмічними мережами зв'язку.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОВІТРЯНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ПЛАТФОРМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

### **2.1 Ключові параметри інтеграції телекомунікаційних мереж з використанням повітряних безпілотних платформ**

**Частотний діапазон та стандартизація.** На сьогоднішній день супутникові системи забезпечують доступ до високочастотних діапазонів, зокрема Ka (27-40 ГГц) та Ku (12-18 ГГц). Проте ці частотні діапазони не підтримуються більшістю пристроїв кінцевих користувачів, зокрема смартфонами, що обмежує їхню безпосередню взаємодію з супутниками. З метою забезпечення сумісності з наявною інфраструктурою споживацьких пристроїв, передбачається необхідність трансляції сигналів у низькочастотних діапазонах, таких як S та L, які вже використовуються широким спектром мобільних пристроїв.

Це, у свою чергу, вимагає створення супутників із більш потужними та чутливими радіоприймачами, здатними ефективно передавати сигнали на земну поверхню. Водночас супутникові системи повинні долати низку викликів, пов'язаних із поширенням сигналу, зокрема затуханням, затримками та впливом атмосферних явищ [49].

Запровадження зв'язку типу Direct-to-Handset (D2H) у рамках АКМЗ потребуватиме значного підвищення щільності супутникового покриття задля забезпечення безперервного та надійного зв'язку. Один супутник повинен буде обслуговувати велику кількість UE, гарантуючи належний рівень QoS.

Для забезпечення стабільної роботи у змінних умовах мобільності супутникові платформи мають бути всебічно протестовані на відповідність вимогам мобільного зв'язку. Відповідно до стандартів 3GPP, частотні смуги NR, наведені у Таблиці 2.1 (а також смуги LTE, зазначені у Таблиці 2.2), вже визначені або перебувають на етапі стандартизації для забезпечення супутникового зв'язку з UE у рамках архітектури АКМЗ.

Однією з ключових технічних відмінностей супутникового зв'язку від традиційного мобільного зв'язку є використання спеціально визначених частотних піддіапазонів. У межах специфікацій 3GPP Release 17, зокрема в документах TS 38.108 та TS 38.133, для супутникового зв'язку визначено піддіапазони n255 та n256. Обидва ці діапазони належать до частотної групи FR1 (Frequency Range 1), яка охоплює частоти до 6 ГГц і є найпоширенішою у сучасних мобільних мережах.

Таблиця 2.1

Супутникові смуги пропускання NR АКМЗ, визначені в 3GPP (див. TS 38.101-5 [55]):

Стандарт 3GPP	NR смуга пропускання	Висхідна смуга пропускання (супутник/UE – прийом/передача)	Низхідна смуга пропускання (супутник/UE – передача/прийм)	Примітки
Rel-17	n256	1980-2010 МГц	2170-2200 МГц	FR1, FDD, S-діапазон
Rel-17	n255	1626,5-1660 МГц	1525-1559 МГц	FR1, FDD, L-діапазон
Rel-18	n254	1610-1626,5 МГц	2483,5-2500 МГц	FR1, FDD, LS-діапазон
Rel-18	n512 n511 n510	27,5-30 ГГц 28,35-30 ГГц 27,5-28,35 ГГц	17,3-20,2 ГГц 17,3-20,2 ГГц 17,3-20,2 ГГц	FR2, FDD, Ка-діапазон

У той час як специфікації Release 18 наразі не встановлюють широкого переліку частотних діапазонів для доступу до супутникових пристроїв у мережах 5G АКМЗ, вже закладено основу для їхнього подальшого розвитку. Зокрема, частотна група АКМЗ FR1 охоплює діапазон від 410 до 7125 МГц і включає в себе піддіапазони n255 та n256, які відповідають частотам L- та S-діапазонів відповідно до класифікації, усталеної в супутниковій галузі.

Таблиця 2.2

#### Частотні піддіапазони 5G FR1

Назва частотного піддіапазону 5G FR1	Частота в висхідній лінії зв'язку, МГц	Частота в низхідній лінії зв'язку, МГц
n256	1980-2010	2170-2200
n255	1626-1660	1525-1559

Крім того, визначено й другий частотний діапазон для АКМЗ – FR2, який охоплює частоти в межах від 17,3 до 30 ГГц і включає діапазон Ka, що використовується в сучасних супутникових системах. У межах цього діапазону на рівні 3GPP пропонуються три супутникові піддіапазони: n510, n511 та n512. Піддіапазон n512 є релевантним для європейських країн, які керуються рішеннями Комітету з електронних комунікацій (ЕСС) у межах Європейської конференції поштових і телекомунікаційних адміністрацій (СЕРТ), включаючи Україну.

З метою оцінки впливу затримок розповсюдження сигналу на якість мовлення у супутникових мережах, доцільно здійснити розрахунок часових затримок, що виникають при передачі сигналу між користувацьким терміналом та супутником. На рисунку нижче проілюстровано геометричну модель взаємодії, яка включає орбіту супутника та зону його видимості відносно мобільного пристрою, розміщеного на поверхні Землі [32].

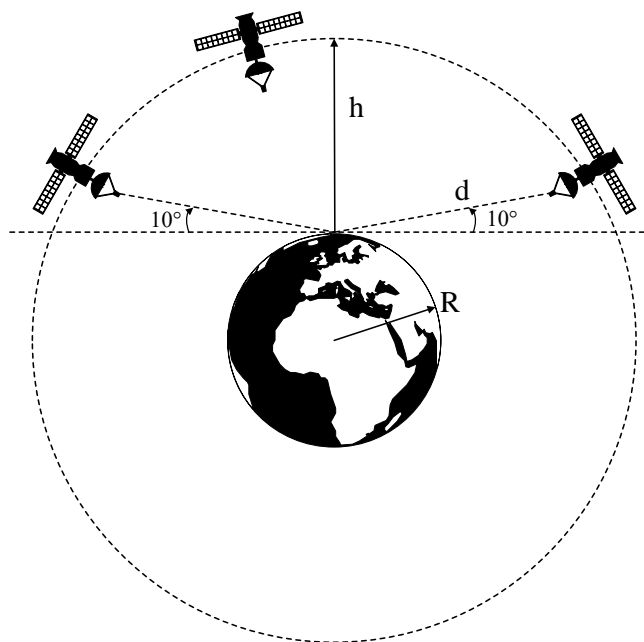


Рис. 2.1. Схема супутникового зв'язку

На Рисунку 2.1:  $h$  – висота орбіти супутника;  $R$  – радіус Землі, прийнятий у розрахунках як 6378137 м (~6378 км);  $d$  – відстань від терміналу користувача до супутника (км);  $\alpha$ ,  $10^\circ$  – кут місця (градуси), мінімальне значення якого встановлено з урахуванням обмеження впливу атмосфери та забезпечення стабільного каналу зв'язку.

Для визначення максимальної відстані до супутника, яка є критичною для оцінки затримок, застосовується формула, рекомендована в стандарті ITU-R S.1257 [56]:

$$d = \sqrt{R^2 \sin^2 \left( \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \right) + 2Rh + h^2 - r \cdot \sin \left( \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \right)} \quad (2.1)$$

На основі цієї формули здійснюється розрахунок максимальної затримки поширення сигналу для радіолінії типу «мобільний пристрій-супутник-наземний шлюз» у випадку використання супутників на різних орбітах. У таблиці 2.3 наведено відповідні значення затримок для характерних висот орбіт, що дозволяє оцінити ступінь їх впливу на якість мовного зв'язку, зокрема з погляду суб'єктивного сприйняття користувачем (наприклад, затримка більше 400-500 мс суттєво погіршує комфорт голосового спілкування).

Таблиця 2.3

## Робочі орбіти та параметри супутникового зв'язку

Кут місця	Параметр	Тип орбіти		
		LEO	MEO	GEO
90°	Відстань до супутника, км	600	8000	35786
	Затримка сигналу від телефону до супутника, мс	2	27	119
10°	Відстань до супутника, км	1932	11826	40586
	Затримка сигналу від телефону до супутника, мс	6	39	135
—	Максимальна одностороння затримка від телефону до шлюзу	12	79	271

Згідно з рекомендацією ITU-T G.107 [57], мінімальна одностороння затримка (тобто затримка передачі сигналу від одного абонента до іншого), яка може бути помітною під час голосової телефонної розмови, становить приблизно 100-150 мс. Перевищення цього порогу може впливати на природність діалогу та спричиняти дискомфорт при спілкуванні. На Рисунку 2.2 візуалізовано вплив затримки на сприйняття мовлення кінцевими абонентами.

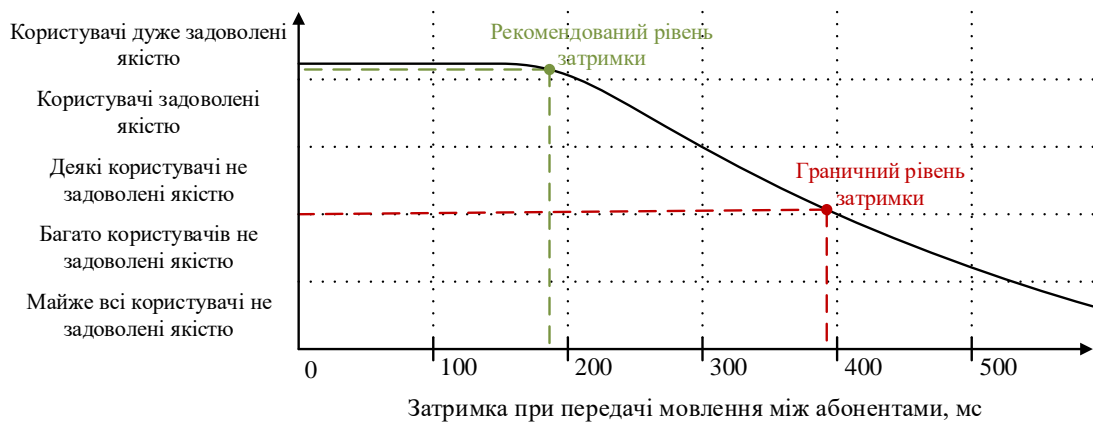


Рис. 2.2. Вплив затримки на сприйняття мовлення

Відповідно до положень рекомендації ITU-T G.114 [58], більшість користувачів починають зазнавати суттєвих труднощів у сприйнятті розмови при односторонній затримці понад 400 мс. Це значення вважається граничним для підтримки прийнятної QoS у голосовому трафіку [33].

У зв'язку з цим у специфікаціях 3GPP для надвеликого супутникового покриття в мережах 5G (наприклад, у сценаріях АКМЗ) визначається максимальна допустима одностороння затримка, яка не повинна перевищувати 400 мс. Додатково зазначено орієнтовні параметри пропускної здатності для забезпечення якісної мовної комунікації: 1 Мбіт/с для низхідного каналу і 100 кбіт/с для висхідного. Ці значення вважаються достатніми для забезпечення голосового зв'язку з відповідним рівнем якості.

Таким чином, затримки, притаманні супутниковому зв'язку, з урахуванням вищезазначених нормативів, можуть вважатися допустимими для реалізації голосових сервісів у межах глобального покриття, за винятком випадків екстремальних відстаней, зокрема при встановленні зв'язку між абонентами, що перебувають на протилежних сторонах земної кулі.

Попри теоретичні розрахунки, у реальних умовах зв'язку відстань між UE та супутником може змінюватися в широкому діапазоні – від приблизно 300 км (LEO) до понад 35 000 км (GEO). Ці величини суттєво перевищують характерні для наземного мобільного зв'язку відстані між UE та базовою станцією БС, які зазвичай не перевищують 100 км [59].

Такі великі відстані зумовлюють значні затримки поширення сигналу, що створює серйозні виклики для системи синхронізації, необхідної для коректної роботи радіоінтерфейсу. У стандартному наземному сценарії мобільного зв'язку синхронізація здійснюється за допомогою механізму Timing Advance (TA), який дозволяє компенсувати затримки, пов'язані з поширенням сигналу.

З технічної точки зору, TA визначає часову різницю між моментом надсилання інформації з боку UE та моментом її отримання БС, забезпечуючи точне вирівнювання кадрів у часовій області. До випуску 3GPP Release 17 цей механізм був стандартизований виключно для наземних базових станцій, що означало відсутність підтримки супутникового каналу у звичайних 5G-терміналах без спеціальної адаптації до АКМЗ-мереж.

Однак у специфікації Release 17 було внесено відповідні модифікації до алгоритму TA, що дозволяють адаптувати його для умов супутникового зв'язку без необхідності радикальної зміни архітектури 5G. Ці зміни дозволяють забезпечити синхронізацію UE з базовою станцією, що діє через супутниковий ретранслятор.

На Рисунку 2.3 схематично зображено архітектуру АКМЗ-зв'язку, у межах якої супутник виконує функцію прозорого ретранслятора («bent-pipe»-архітектура), здійснюючи лише передачу сигналу між UE та наземною базовою станцією без його обробки. На Рисунку 2.3: сервісна лінія – лінія зв'язку телефон-супутник; фідерна лінія – лінія зв'язку шлюз-супутник;  $TA_{UE}$  – затримка поширення сигналу по сервісній лінії від конкретного UE до супутника;  $TA_{фід.}$  – затримка поширення сигналу по фідерній лінії від наземного шлюзу до супутника, яка є спільною для всіх користувачів у зоні покриття даного супутника.

Сумарна затримка сигналу для повного шляху «шлюз-супутник-телефон» позначається як  $TA_{повн.}$  та є сумою затримок, що вносяться сервісною ( $TA_{UE}$ ) та фідерною ( $TA_{фід.}$ ) лініями:

$$TA_{повн.} = TA_{UE} + TA_{фід.} \quad (2.2)$$

У попередніх версіях стандартів 3GPP алгоритми розрахунку та компенсації  $TA_{повн.}$  для супутникових сценаріїв зв'язку не були формалізовані. Вони були вперше

введені в межах 3GPP Release 17, що дало змогу забезпечити синхронізацію UE з урахуванням специфіки супутникових каналів.

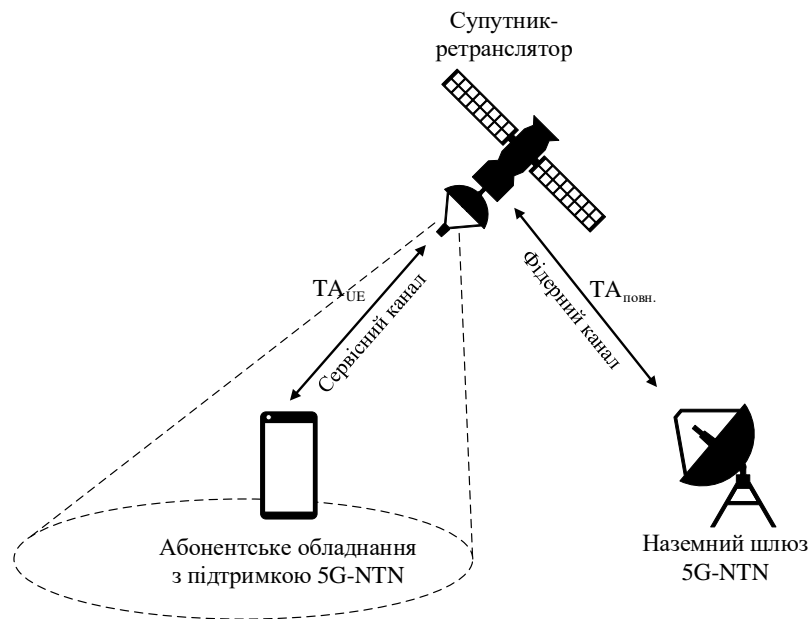


Рис. 2.3. Схема АКМЗ-зв'язку з супутником в ролі ретранслятора

Для обчислення  $TA_{\text{фід.}}$  наземний шлюз повинен мати точну інформацію про власне географічне розташування та актуальні координати супутника на орбіті в заданий момент часу. Визначення власної позиції шлюзу здійснює за допомогою GNSS (Global Navigation Satellite System – Глобальна навігаційна супутникова система). Координати супутника у реальному часі обчислюються на основі ефемеридних даних, тобто набору орбітальних параметрів, що описують положення супутника у певний момент часу [60].

Процедура визначення затримки поширення сигналу по сервісній лінії  $TA_{\text{UE}}$  виконується користувацьким обладнанням (UE) за аналогічним принципом, що і на фідерній ділянці. Для її реалізації пристрій має володіти актуальною інформацією про власне просторове положення та положення супутника на орбіті в заданий момент часу.

Визначення географічних координат здійснюється UE самостійно за допомогою сигналів GNSS. Орбітальні параметри супутника обчислюються на основі ефемерид, які періодично передаються від наземного шлюзу. Розраховане значення  $TA_{\text{UE}}$



інтегрується у стандартний механізм ТА, що використовується для компенсації часових зсувів у процесі передачі сигналів.

Аналогічним чином, інформація про положення супутника (на основі ефемерид), а також координати UE і шлюзу (отримані з GNSS), використовуються для оцінки і компенсації доплерівського зсуву частоти, що виникає внаслідок високої відносної швидкості між UE, супутником і шлюзом.

Ця компенсація необхідна як на стороні UE, так і в мережі, щоб забезпечити коректну синхронізацію частот і уникнути помилок декодування сигналів у фізичному шарі. Здійснення з'єднання із супутником стає неможливим у наступних випадках:

- Користувацький пристрій не може визначити своє місцезнаходження (наприклад, через відсутність GNSS-сигналу);
- Відсутні актуальні ефемериди для відповідного супутника-ретранслятора;
- Отримані ефемериди втратили чинність через їх застарілість.

Таким чином, актуальність і доступність навігаційних та орбітальних даних є критично важливою умовою для встановлення та підтримання стабільного зв'язку в рамках мереж 5G AKM3.

Типові варіанти використання мереж AKM3 у випадку використання з eMBB [61]:

- Широко смугове підключення AKM3 до осередків або ретрансляційних вузлів у районах, що недостатньо обслуговуються, у поєднанні з наземним безпроводовим/стільниковим або проводовим доступом з обмеженою пропускну здатністю для користувачів.
- Широко смугове підключення AKM3 між базовою мережею і осередками в районах, що не обслуговуються (ізолюваних районах), а також для відновлення підключення до загальнодоступної мережі передачі даних у разі ліквідації наслідків стихійних лих або з метою громадської безпеки.
- Широко смугове підключення AKM3 між базовою мережею і осередками на борту платформи, що рухається (наприклад, літака, судна або поїзда), включаючи випадки, коли AKM3 забезпечує підключення до локальної наземної мережі на борту платформи, що рухається.

- Стійкість мережі: Вторинне/резервне підключення для запобігання повному відключенню підключення для критично важливих мережевих каналів (хоча потенційно обмежене за можливостями порівняно з основним мережевим підключенням).
- АКМЗ для з'єднання різних островів локальної мережі доступу 5G, не підключених іншим чином
- Трансляція/багатоадресна передача через АКМЗ, наприклад, для розвантаження популярного контенту з інфраструктури наземної мобільної мережі.

В 15 версії стандарту 3GPP описані такі сценарії розгортання:

- GEO і Ка-діапазон (вищий ГГц-діапазон) з VSAT-ретрансляторами в якості АКМЗ-вузлів і прозорим корисним навантаженням;
- GEO/LEO і S-діапазон (нижчий ГГц-діапазон) з портативними UE в якості АКМЗ-вузлів і прозорим корисним навантаженням;
- LEO і Ка-діапазон (вищий ГГц-діапазон) з VSAT-ретрансляторами в якості АКМЗ-вузлів і регенеративним корисним навантаженням;
- HAPS у S- або Ка-діапазоні з портативними UE в якості АКМЗ-вузлів і регенеративним корисним навантаженням.

5G NR може підтримувати сценарії АКМЗ з наступними покращеннями для нормативної фази [62]:

- Для адаптації таймера краще використовувати рішення на основі компенсації зміщення, при фіксованій на землі області відстеження;
- Покращення MAC для довільного доступу, випередження синхронізації, DRX, запиту планування, HARQ;
- Покращення RLC для звітів про стан, порядкові номери;
- Покращення PDCP для відкидання SDU, порядкові номери;
- Покращення режиму очікування для додаткової допоміжної інформації для вибору/повторного вибору стільника, наприклад, місцезонашування UE та інформації супутникових ефемерид, при фіксованій на землі області

відстеження для уникнення частих TAU, специфічна для АКМЗ-стільника інформація в SIB.

- Покращення режиму підключення для зменшення переривання обслуговування під час хендоверу через велику затримку розповсюдження, рішення частого хендоверу та високої частоти хендоверів через переміщення супутника, підвищення надійності передачі через невелику зміну сили сигналу в областях перекриття променів, компенсацію відмінностей у затримці розповсюдження у вікні вимірювання UE між стільниками, що надходять від різних супутників.
- Інші покращення мобільності: додаткові умови запуску СНО, покращення конфігурації мобільності, конфігурації вимірювань/звітності, безперервності обслуговування між телекомунікаційною мережею та АКМЗ.
- Процедура RACH: включення допоміжної інформації із компромісом між збільшенням затримки та накладними витратами UL.

*Управління мобільністю.* Для забезпечення мобільності в АКМЗ мережа надає ефемериди супутників обслуговуючого та сусіднього стільника, необхідні для доступу до цільового обслуговуючого стільника АКМЗ в команді хендоверу.

UE підтримує мобільність між АКМЗ і наземною мережею (тобто від АКМЗ до наземної мережі (прийом) і від наземної мережі до АКМЗ (передача)), але від нього не вимагається одночасне підключення до АКМЗ і наземної мережі. Він також може підтримувати мобільність між технологіями радіодоступу, що базуються на різних орбітах (GSO, NGSO на різній висоті).

Необхідні тригерні умови, за яких UE може виконати умовний хендовер (Conditional Hand-Over – CHO) до стільника-кандидата: подія A4, тригерна умова на основі часу, тригерна умова на основі місцезнаходження. Дві останні умови налаштовуються разом з однією з умов запуску на основі вимірювань. Місцезнаходження визначається відстанню між UE та еталонним місцезнаходженням. Час визначається проміжком часу між T1 і T2, де T1 – абсолютне значення часу, а T2 – тривалість, що починається з T1.

Для вимірювань мережа може конфігурувати декілька конфігурацій часу вимірювання блоків SS/PBCH, або SMTC (Block Measurement Timing Configuration), паралельно на кожну несучу і для заданого набору стільників в залежності від можливостей UE, використовуючи різницю затримки поширення і інформацію про ефемериди. Вона також може конфігурувати проміжки між вимірюваннями на основі декількох SMTC [49].

Можливе коригування SMTC – під контролем мережі на основі допоміжної інформації UE, якщо він доступний для режиму з'єднання, та під контролем UE на основі місцезнаходження UE та допоміжної інформації супутника (наприклад, ефемериди, загальні параметри TA) для режимів неактивності. UE повинен повідомити загальну інформацію про своє місцезнаходження на запит мережі, після встановлення безпеки AS в режимі підключення до NG-RAN, якщо вона доступна. Ця інформація є найбільш важливими бітами координат GNSS, що забезпечують точність порядку 2 км [63].

*Сигналізація NG-RAN.* Ідентифікатор стільника, що передається gNB до базової мережі як частина інформації про місцезнаходження користувача, відповідає ідентифікатору стільника при нанесенні на карту, незалежно від орбіти корисного навантаження АКМЗ або типів підтримуваних сервісних каналів зв'язку. Вона використовується для оптимізації пейджингових повідомлень в інтерфейсі NG, зоні інтересу і службах оповіщення населення.

Ідентифікація стільника, включена в ідентифікацію цілі в повідомленнях про передачу, дозволяє ідентифікувати правильну цільову стільникову станцію, а також для пейджингового зв'язку RAN.

Відповідність між ідентифікаторами стільників і географічними районами налаштовується в RAN і опорній мережі. gNB відповідає за створення ідентифікатора прив'язаної стільникової мережі на основі інформації про місцезнаходження UE, отриманої від UE, якщо вона є доступною. Планування може бути попередньо налаштоване (наприклад, відповідно до політики оператора) або до впровадження.

gNB повідомляє інформацію про трансльовані ТАС обраної наземної рухомої мережі загального користування (Public Land Mobile Network – PLMN) до AMF як

частину інформації про місцезнаходження обладнання користувача (UE Location Information – ULI). Якщо gNB знає інформацію про місцезнаходження UE, gNB може визначити індикатор зони відстеження (Tracking Area Indicator – TAI), в якій зараз знаходиться UE, і надати цей індикатор AMF як частину ULI. Дані про місцезнаходження користувачів, що надсилаються до NG-RAN, забезпечують високоточну локалізацію з типовою точністю від 1-3 метрів у приміщенні до 20-50 метрів на відкритому просторі. За ідеальних умов, таких як пряма видимість (LOS) у густонаселених міських районах – точність може перевищувати 10 метрів [64]. Ця інформація використовується для оновлення функції управління місцем розташування (LMF) та забезпечення роботи розширених послуг.

Для UE в стані RRC\_CONNECTED, коли gNB налаштований так, щоб забезпечити підключення UE до AMF, який обслуговує країну, в якій знаходиться UE. Якщо gNB виявляє, що UE знаходиться в іншій країні, ніж та, яку обслуговує обслуговуючий AMF, то він повинен виконати хендвер NG для зміни на відповідний AMF або ініціювати процедуру запиту на контекстуальне звільнення UE до обслуговуючого AMF (у цьому випадку AMF може вирішити скасувати реєстрацію UE) [29].

Таким чином, визначено, що застосування БПЛА в якості базових станцій в АКМЗ мережах забезпечуватиме меншу затримку та кращу QoS за використання прозорі архітектури в порівнянні з підходом Direct-to-Handset. Для правильного моделювання каналу необхідно враховувати доплерівський зсув та завмирання сигналу, що і є частковою задачею дослідження. Врахування доплерівського зсуву потребуватиме коректних даних про місцезнаходження UE та БПЛА. На стороні абонента це забезпечуватиметься в межах ULI з точністю від 1-3 метрів у приміщенні до 20-50 метрів на відкритому просторі та 10 метрів за умов прямої видимості. Процес надання коректних даних про місцезнаходження БПЛА потребує подальшого розгляду.

## **2.2 Методи визначення місцезнаходження БПЛА в діючій телекомунікаційній мережі**

Хоча БПЛА пропонують значні переваги в екосистемі 5G, що розвивається, вони також створюють нові ризики для безпеки. Більше того, БПЛА сьогодні розглядаються поряд з крилатими ракетами як нові загрози національній безпеці. Як наслідок, існує нагальна потреба в надійних системах, здатних виявляти та ідентифікувати БПЛА.

Методи виявлення БПЛА поділяються на чотири основні категорії: радіолокаційні, комп'ютерного зору, акустичні та радіочастотні (RF) підходи. Різні технології виявлення і відстеження БПЛА мають різні компроміси з точки зору вартості, точності, дальності дії, енергоефективності (особливо важливо для датчиків, що живляться від батарей), портативності (наприклад, датчики, встановлені на БПЛА) і складності системи, як показано в Таблиці 2.4.

Певні технології, такі як радар і комп'ютерний зір, оптимально працюють лише в умовах LoS, тоді як інші, такі як радіолокаційні методи, можуть ефективно функціонувати навіть в умовах NLoS. Для точного і швидкого виявлення і відстеження важливе значення мають методи об'єднання даних, які інтегрують вхідні дані з різних типів датчиків [52].

Метод на основі кута надходження сигналу (AoA – Angle of Arrival) пропонується як основний метод для виявлення БПЛА при втраті зв'язку з контролером, в той час як метод на основі комп'ютерного зору пропонується як другорядний із-за вимог LoS.

Методи на основі радіолокації мають обмежену ефективність із-за низької ефективної площі розсіювання (Radar Cross Section – RCS) типового дрону.

Метод на основі акустичних сигналів вимагає низького рівня навколишнього шуму для високої точності виявлення, що нереалістично в міських умовах, в яких повинна працювати телекомунікаційна система з застосуванням повітряних безпілотних платформ.

Порівняння переваг та недоліків різних методів виявлення та відстеження  
БПЛА

Метод виявлення	Переваги	Недоліки
На основі радіочастотних сигналів	Недорогі радіочастотні датчики, працюють в умовах відсутності прямої видимості (NLoS), велика дальність виявлення.	Необхідність попередньої ідентифікації/класифікації різних дронів.
На основі радіолокації	Недорогі радары з частотною модуляцією безперервної хвилі (FMCW) не піддаються впливу туману/хмар/пилу, на відміну від технологій, що базуються на зорі, і можуть працювати в умовах NLoS. Вищі частоти (міліметровий діапазон) дозволяють точно фіксувати мікродоплер за рахунок більших втрат на шляху. Не вимагають активної передачі з дрона.	Невеликий RCS дрону ускладнює його ідентифікацію/класифікацію. Необхідні подальші дослідження для точного виявлення/класифікації дронів та методів машинного навчання, з урахуванням різних радарів та геометрій/типів дронів, які впливають на мікродоплерівські сигнатури. Більші втрати в діапазоні міліметрових хвиль обмежують дальність виявлення дронів.
На основі акустичних сигналів	Низька вартість простих мікрофонів (вартість залежить від якості мікрофонів). Може працювати в NLoS, якщо дрон чутний.	Необхідно розробити базу даних акустичних сигнатур для різних дронів. Необхідні знання про поточні вітрові умови та фоновий шум. Може працювати з перебоями в умовах високого рівня навколишнього шуму, наприклад, в міських умовах.
На основі комп'ютерного зору	Низька вартість основних оптичних датчиків. Камери багатьох комерційних дронів можуть використовуватися як датчики.	Вища вартість тепловізійних, лазерних камер та камер з широким полем зору (FOV). Вимагає прямої видимості. Рівень видимості залежить від туману, хмар та пилу.

Виявлення та класифікація БПЛА за допомогою радіочастотних сигналів зазвичай поділяються на дві основні категорії: радіочастотний цифровий відбиток

(Fingerprint) та цифровий відбиток за допомогою Wi-Fi [43]. Обидва підходи покладаються на пристрої радіочастотного зондування, які перехоплюють сигнали зв'язку між БПЛА і його дистанційним контролером. При радіочастотному цифровому відбитку характеристики фізичного рівня або унікальні радіочастотні підписи цих перехоплених сигналів витягуються, а потім обробляються алгоритмами машинного навчання (ML) для ідентифікації та класифікації БПЛА або його контролера. З іншого боку, Wi-Fi цифровий відбиток фокусується на характеристиках контролю доступу до середовища (Medium Access Control – MAC) і мережевих рівнях радіосигналів БПЛА для виявлення і класифікації.

Методи цифрового відбитку на основі RF залежать від відмінних рис, виявлених у радіочастотних сигналах, що передаються різними БПЛА або їхніми контролерами. Експериментальні дослідження показали, що комерційні БПЛА часто мають унікальні радіочастотні сигнатури, що виникають через відмінності в їхніх апаратних конструкціях і схемах модуляції. Як наслідок, ці радіочастотні відбитки, отримані із захоплених сигналів БПЛА або його пульта дистанційного керування, можуть бути ефективно використані для ідентифікації БПЛА [43].

Методи виявлення цифрового відбитку на основі Wi-Fi засновані на спостереженні, що деякі БПЛА покладаються на Wi-Fi-з'єднання для управління і передачі відео. Ці методи використовують пристрої для перехоплення пакетів Wi-Fi для перехоплення даних, якими обмінюються БПЛА та його контролер. Аналізуючи цей Wi-Fi-трафік і виділяючи специфічні особливості відбитків, БПЛА можна виявити та ідентифікувати. Використовувані характеристики включають MAC-адреси, середньоквадратичне значення довжини пакетів, тривалість пакетів і середній час між прибуттями [44]. Потім ці характеристики були введені в алгоритми машинного навчання для класифікації БПЛА, причому моделі випадкового дерева і випадкового лісу (RandF) забезпечують найвищу точність на основі показників істинних і хибних спрацьовувань.

Ключовою проблемою методів виявлення цифрового відбитку через Wi-Fi є конфіденційність. Та ж система, що використовується для моніторингу трафіку БПЛА, може також потенційно перехоплювати і підробляти дані Wi-Fi з персональних



пристроїв або приватних мереж. Крім того, ефективність цього підходу обмежена тим, що лише невелика частина комерційних дронів використовує Wi-Fi для управління і передачі відео – більшість покладаються на власні протоколи зв'язку [45].

Пасивна система радіочастотного моніторингу, що перехоплює сигнали управління між БПЛА та контролером використовує радіочастотну антену на 2,4 ГГц і високочастотний осцилограф, здатний робити вибірки зі швидкістю 20 гігавибірок на секунду. Така висока частота дискретизації дозволяє системі точно фіксувати детальні перехідні процеси в сигналах радіочастотного сигналу [53]. Ці перехідні характеристики відрізняються в різних БПЛА-контролерах, що робить їх цінними для виявлення та класифікації [49].

Крім того, оскільки більшість комерційних БПЛА використовують частотний діапазон 2,4 ГГц, пасивна система радіомоніторингу може бути спеціально налаштована для роботи в цьому діапазоні. Однак цей діапазон частот також використовується іншими безпроводовими технологіями, такими як Wi-Fi і Bluetooth, а це означає, що сигнали від цих пристроїв можуть заважати виявленню сигналів управління БПЛА.

Пасивна система радіочастотного моніторингу повинна визначати, чи походить отриманий сигнал від БПЛА-контролера, пристрою, що заважає, або фоновому шуму. Якщо сигнал походить від БПЛА-контролера, система повинна точно визначити, який це контролер. Аналогічно, якщо сигнал походить від джерела перешкод, вона повинна правильно класифікувати це джерело. Це створює проблему виявлення за кількома гіпотезами, складність якої зростає зі збільшенням кількості можливих джерел сигналу [60]. Щоб впоратися з цією складністю, можна використовувати багатоетапний послідовний підхід до виявлення, починаючи з серії простих бінарних тестів гіпотез, які легше обробляти.

Початковим кроком у виявленні контролера БПЛА є збір даних. Як правило, цей необроблений набір даних є великим і містить значну кількість шуму. Щоб вирішити цю проблему, дані спочатку обробляються за допомогою вейвлет-аналізу з множинною роздільною здатністю, щоб зменшити шум і підвищити чіткість сигналу. Після попередньої обробки дані надсилаються до двоетапної системи виявлення. На

першому етапі за допомогою байєсівської гіпотези визначається, чи є сигнал справжнім радіосигналом, чи просто фоновим шумом. Якщо радіосигнал підтверджено, система переходить до другого етапу, де вона оцінює, чи походить сигнал від джерела перешкод, такого як Wi-Fi або Bluetooth, або від БПЛА-контролера. Ця оцінка ґрунтується на аналізі смуги пропускання та модуляційних характеристик. Якщо сигнал не ідентифікується як перешкода, вважається, що він походить від БПЛА-контролера, і передається до модуля класифікації на основі машинного навчання для остаточної ідентифікації.

Припустимо, що кожна безпілотна базова станція (БПЛА-БС) розташована в координатах  $(x_i, y_i)$  для  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  в межах визначеного географічного регіону, розташовуючись у фіксованій шестикутній сітці. Потім кожна БПЛА-БС повідомляє про своє місцезнаходження та інформацію про спектральну ефективність своїх користувачів на центральний сервер. Ці БПЛА-БС розгортаються в прямокутній зоні моделювання без урахування розташування існуючих макробазових станцій (MBS). Далі обчислюється 5-й процентиль спектральної ефективності (5pSE) для цієї гетерогенної мережі типу «повітря-земля» (AG-HetNet) за допомогою алгоритму грубої сили [65]. Нарешті, оптимізовані налаштування координації міжстільникових завад (Inter-Cell Interference Coordination – ICIC) зберігаються в матриці SICIC, і конфігурація, яка дає найкращі 5pSE, може бути визначена за допомогою фіксованих позицій шестикутників БПЛА-БС  $X_{\text{БПЛА-БС}}^{(\text{hex})}$  в межах області моделювання:

$$[\hat{\alpha}, \hat{\rho}, \hat{\tau}, \hat{\rho}'] = \arg \max_{\alpha, \rho, \tau, \rho'} C_5 \left( X_{\text{БПЛА-БС}}^{(\text{hex})}, \alpha, \rho, \tau, \rho' \right) \quad (2.3)$$

Для визначення оптимального розміщення БПЛА-БС центральний сервер може використовувати евристичний підхід з використанням генетичного алгоритму [66].

Розташування БПЛА-БС та параметри ICIC, які максимізують цільову функцію 5pSE, можна обчислити як:

$$[\hat{X}_{\text{БПЛА-БС}}, \hat{\alpha}, \hat{\rho}, \hat{\tau}, \hat{\rho}'] = \arg \max_{X_{\text{БПЛА-БС}}, \alpha, \rho, \tau, \rho'} C_5 (X_{\text{БПЛА-БС}}, \alpha, \rho, \tau, \rho') \quad (2.4)$$

Через високе обчислювальне навантаження, пов'язане з надлишковими методами пошуку (грубим перебором) для визначення оптимального розміщення БПЛА-БС і параметрів ІСІС генетичний алгоритм є ефективною альтернативою. ГА використовується для одночасної оптимізації координат БПЛА-БС  $X_{\text{БПЛА-БС}}$  та параметрів ІСІС  $\tau$ ,  $\alpha$ ,  $\rho$ , і  $\rho'$ . Враховуючи гнучкість і можливості репозиціонування БПЛА-платформ, підхід на основі ГА дозволяє динамічно змінювати розташування БПЛА-БС для підвищення загальної продуктивності мережі в межах цільової зони покриття.

На відміну від стаціонарної наземної інфраструктури, такої як наземні станції (БС), точки доступу та ретрансляційні вузли, БПЛА мають високу мобільність, що дозволяє їм динамічно змінювати своє положення у відповідь на мінливі вимоги до зв'язку [67]. Ця мобільність надає додатковий ступінь свободи у проектуванні, а саме оптимізацію траєкторії, яка доповнює традиційні стратегії розподілу ресурсів. Використовуючи цю гнучкість, платформи на базі БПЛА можуть значно підвищити загальну ефективність комунікації [68].

Розглянемо типову систему безпроводового зв'язку з використанням БПЛА, де БПЛА використовується для надання послуг декільком наземним користувачам. Траєкторія польоту БПЛА позначається  $q(t) \in \mathbb{R}^3 \times 1$ , що представляє його тривимірний вектор положення, який змінюється в часі. Відповідно,  $r(t)$  відображає динамічний розподіл ресурсів зв'язку, таких як потужність передачі, ширина спектру, стратегії формування променя та призначення каналів [69]. Таким чином, спільна оптимізація траєкторії БПЛА та ресурсів зв'язку може бути сформульована як загальна математична модель.

$$\begin{aligned} & \max_{\{q(t)\}, \{r(t)\}} U(\{q(t)\}, \{r(t)\}) \\ & \text{за умови: } f_i(\{q(t)\}) \geq 0, i = 1, \dots, I_1, \\ & \quad g_i(\{r(t)\}) \geq 0, i = 1, \dots, I_2, \\ & \quad h_i(\{q(t)\}, \{r(t)\}) \geq 0, i = 1, \dots, I_3, \end{aligned} \tag{2.5}$$

де  $U(\{q(t)\}, \{r(t)\})$  – функція корисності, яку потрібно максимізувати, яка може представляти набір параметрів, такі як пропускна здатність, енергоефективність, ймовірність покриття або мінімізоване споживання енергії.  $f_i(\{q(t)\})$  – обмеження мобільності БПЛА, такі як максимальна швидкість, прискорення або висота польоту,  $g_i(\{r(t)\})$  – обмеження на комунікаційні ресурси, включаючи енергетичні бюджети та доступну пропускну здатність,  $h_i(\{q(t)\}, \{r(t)\})$  – пов’язані обмеження, які спільно залежать від траєкторії БПЛА та розподілу ресурсів. Типовим прикладом є обмеження щодо перешкод у каналі, яке забезпечує регулювання потужності передачі та положення БПЛА для утримання перешкод для інших користувачів у прийнятних межах.

Межі мінімальної/максимальної висоти:

$$H_{min} \leq [q(t)] \leq H_{max}, \forall t, \quad (2.6)$$

де  $q(t)$  – висота БПЛА виражена вектором  $q$ .

У різних практичних застосуваннях початкова та/або кінцева позиції БПЛА протягом визначеного інтервалу часу  $\{0, T\}$  є заздалегідь визначеними. Така ситуація зазвичай виникає, коли операції БПЛА обмежуються конкретними місцями запуску та приземлення або коли цілі місії чітко визначають точки відправлення та призначення, наприклад, у таких завданнях, як доставка вантажів повітрям. Ці вимоги до позиції можуть бути включені в модель планування траєкторії як граничні умови. Математично це можна виразити як:

$$q(0) = q_I, \quad q(T) = q_F \quad (2.7)$$

де  $q_I, q_F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  – задані початкове/кінцеве положення.

Максимальна/мінімальна швидкість БПЛА:

$$V_{min} \leq \|v(t)\| \leq V_{max}, \quad \forall t, \quad (2.8)$$

де  $v(t) \triangleq \dot{q}(t)$  – швидкість БПЛА. Зазвичай для гвинтокрилих БПЛА  $V_{\min} = 0$  тоді як для БПЛА з нерухомим крилом  $V_{\min} > 0$ .

Обмеження максимального прискорення:

$$\|a(t)\| \leq a_{\max}, \quad \forall t, \quad (2.9)$$

Нехай  $a(t) \triangleq \ddot{q}(t)$  позначає вектор прискорення БПЛА. Для платформ, таких як БПЛА з фіксованим крилом, що виконують повороти з нахилом, обмеження на максимально допустиме прискорення по суті накладає обмеження на здатність БПЛА до поворотів. Ця залежність є критично важливою для підтримки стабільності польоту та забезпечення можливого планування траєкторії [70].

Уникнення перешкод: щоб запобігти зіткненням із відомими статичними перешкодами, розташованими в точці  $r \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ , потрібно ввести обмеження, яке вимагає від БПЛА дотримання мінімальної безпечної відстані  $D_1$  від перешкоди. Це забезпечує захищену буферну зону навколо об'єкта на всій траєкторії БПЛА:

$$\|q(t) - r\| \geq D_1, \quad \forall t, \quad (2.10)$$

Уникнення зіткнень між безпілотними літальними апаратами: у системах з декількома безпілотними літальними апаратами безпека між ними забезпечується за допомогою обмежень відстані між парами. Для будь-яких двох безпілотних літальних апаратів, позначених індексами  $m$  і  $j$ , планування траєкторії повинно гарантувати, що відстань між ними залишається більшою за заздалегідь визначений поріг  $\Delta_{\min}$ , тим самим уникнувши потенційних зіткнень у повітрі:

$$\|q_m(t) - q_j(t)\| \geq \Delta_{\min}, \quad \forall m > j, \forall t, \quad (2.11)$$

Безпольотна зона: Обмеження, пов'язані із забороненим повітряним простором, відомі як зони заборони польотів, включаються на основі геометричної форми обмеженої зони. Для кубічного або прямокутного об'єму необхідно дотримуватися

набору лінійних нерівностей, щоб безпілотний літальний апарат залишався поза межами всіх шести обмежувальних гіперплощин, визначених параметрами  $\{a_i, b_i\}_{i=1}^6$  [71]. Це можна виразити за допомогою логічних умов, де для двох умов  $C_1$  і  $C_2$  об'єднання  $C_1 \cup C_2$  означає, що принаймні одне із зазначених обмежень має бути істинним:

$$\bigcup_{i=1}^6 a_i^T q(t) \geq b_i, \forall t, \quad (2.12)$$

Проблема пошуку траєкторії БПЛА з врахуванням розподілу комунікаційних ресурсів, визначена в рівняннях (2.9)-(2.12), ставить значні обчислювальні виклики. Змінні рішення, а саме траєкторія БПЛА  $q(t)$  та розподіл комунікаційних ресурсів  $r(t)$ , є функціями безперервного часу, що означає нескінченновимірний простір оптимізації, який не можна безпосередньо обробити за допомогою традиційних методів [74]. Щоб вирішити ці проблеми і отримати практичні, високоякісні рішення, необхідно розробити набір ефективних алгоритмічних стратегій для оптимізації траєкторії БПЛА і комунікаційних ресурсів.

Таким чином, необхідно покращити модель каналу передавання інформації між абонентом і базовою станцією, для врахування адитивного гаусівського шуму, доплерівського зсуву та завмирання багатопозиційного сигналу при умові постійної зміни місцезнаходження абонента та базової станції. Мета створення моделі це її використання в основі функції обчислення оптимальної зміни місцезнаходження БПЛА-БС з врахуванням параметрів каналу між абонентами.

### **2.3 Удосконалення математичної моделі каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем в умовах невизначеності з врахуванням завмирання сигналу**

Основна завада, яка сприяє зниженню завадостійкості – це завмирання сигналу. Каналом із завмираннями називають такий канал, у якому амплітуди складових

сигналу, що надходить до приймача, зазнають флуктуацій. У реальних умовах змінам амплітуди зазвичай супроводжують і зміни фази, тому за наявності завмирань фаза прийнятого сигналу також є певною мірою невизначеною. Коротко фізичну природу завмирань можна описати так: промені, що надходять до приймача, відбиваються або розсіюються в деякому об'ємі іоносфери чи тропосфери, внаслідок чого різниця ходу набуває величини порядку довжини хвилі [72].

У каналі із завмираннями сигнал зазвичай поширюється кількома шляхами. Через різницю довжин цих шляхів у приймальній антені виникає сума коливань з різними амплітудами та фазами. Саме інтерференція цих складових за умов, коли різниці ходу променів не є сталими, і спричиняє флуктуації як амплітуди, так і фази сигналу [73]. Припустимо, що різниці ходу є досить малими порівняно з тривалістю тактового інтервалу, тому їх вплив на моменти його початку та завершення не враховуватимемо.

Нехай передається сигнал:

$$z(t) = \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \quad (2.13)$$

На вхід приймального пристрою надходить  $n$  променів, кожному з яких відповідають власний час поширення  $t_{pi}$  та коефіцієнт передачі  $\mu_i$ . Для відносно вузькосмугових сигналів можна вважати, що  $t_{pi}$  і  $\mu_i$  є однаковими для всіх складових, тобто не залежать від індексу. Наприклад, ми використовуємо багатопозиційний сигнал, де є два варіанти амплітуд. Тоді прийнятий багатопозиційний сигнал можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} z'_1(t) &= \sum_{i=1}^n \mu_i \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos[k\omega_0(t - t_{pi}) + \varphi_k] + n(t) = \\ &= \sum_{i=1}^n \mu_i \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos[k\omega_0(t - \bar{t}_p) + \varphi_k + \psi_{ik}] + n(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned}
z'_2(t) &= \sum_{i=1}^n \mu_{2i} \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos[k\omega_0(t - t_{2ip}) + \varphi_k] + n(t) = \\
&= \sum_{i=1}^n \mu_{2i} \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos[k\omega_0(t - \bar{t}_p) + \varphi_k + \psi_{2ik}] + n(t)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

де  $\bar{t}_p$  – середній час поширення для всіх променів, а завада є адитивною.

$$\psi_{ik} = k\omega_0(\bar{t}_p) \tag{2.16}$$

У цьому випадку виконується нерівність:

$$|\Delta t_i| \ll \frac{1}{F} = \frac{T}{k_2 - k_1 + 1} \tag{2.17}$$

Отже, значення для певного індексу  $i$ , що лежать у межах від  $2\pi \frac{k_1}{T} \Delta t_i$  до  $2\pi \frac{k_2}{T} \Delta t_i$ , відрізняються одне від одного не більш ніж на  $2\pi F \Delta t_i \ll 2\pi$ . Тому в першому наближенні можна вважати, що значення  $\psi_{ik}$  не залежать від номера складової  $k$ , хоча для різних значень індексу  $i$ , тобто для різних променів, вони можуть суттєво відрізнятися. В випадку використання шістнадцяткового багатопозиційного сигналу коефіцієнт мережі буде визначатись амплітудою варіанту сигналу.

$$\begin{aligned}
z'(t) &\approx \sum_{i=1}^n \mu_i \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos[k\omega_0 t' + \varphi_k + \psi_i] + n(t) = \\
&= \sum_{i=1}^n \mu_i \cos \psi_i \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos(k\omega_0 t' + \varphi_k) - \\
&\quad - \sum_{i=1}^n \mu_i \sin \varphi_i \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \sin(k\omega_0 t' + \varphi_k) + n(t) =
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
&= \mu_c \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \cos(k\omega_0 t' + \varphi_k) + \mu_s \sum_{k=k_1}^{k_2} c_k \sin(k\omega_0 t' + \varphi_k) + n(t) = \\
&= \mu_c z(t) + \mu_s z(t) + n(t) = \mu \sum_{i=1}^n c_k \cos(k\omega_0 t' + \varphi_k + \theta) + n(t), \quad (2.18)
\end{aligned}$$

де  $\mu_c = \sum_{i=1}^n \mu_i \cos \psi_i$ ;  $\mu_s = -\sum_{i=1}^n \mu_i \sin \psi_i$ ;  $\mu = \sqrt{\mu_c^2 + \mu_s^2}$ ;  $\theta = \tan^{-1} \frac{\mu_s}{\mu_c}$ ;  $t' = t - t_p$ .

Величину  $\mu$  формально можна трактувати як модуль вектору зі складовими  $\mu_c$  і  $\mu_s$ . Отже, вхідний сигнал відрізняється від переданого випадковим коефіцієнтом передачі та випадковим, але приблизно однаковим для всіх частотних складових, зсувом фази  $\theta$ .

Умовна ймовірність помилкового прийому окремого елемента сигналу в каналі з повільними загальними завмираннями збігається з імовірністю помилки в каналі без завмирань, якщо її обчислювати для відповідного миттєвого значення відношення енергії елемента сигналу до спектральної щільності завади  $h^2$ . Водночас у процесі завмирань величина  $h^2$  змінюється пропорційно  $\mu^2$ . Тому для знаходження повної ймовірності помилкового прийому елемента сигналу потрібно усереднити цю умовну ймовірність за законом розподілу величини.

Якщо позначити математичне сподівання величини через  $h_0^2$ :

$$h^2 = \frac{\mu^2}{\mu_0^2} h_0^2 \quad (2.19)$$

Нехай імовірність помилок у каналі без завмирань задається функцією  $f(h)$ . Тоді повна ймовірність помилок у каналі з повільними загальними завмираннями визначається як:

$$p = p(h_0) = \int_0^{\infty} w(\mu)' f\left(\frac{\mu h_0}{\mu_0}\right) d\mu \quad (2.20)$$

де  $w(\mu)$  – густина ймовірності коефіцієнту передачі, що характеризує завмирання.

Для підтвердження математичної моделі було проведено імітаційне моделювання каналу між базовою станцією та користувачем, параметри моделювання вказані в Таблиці 2.5. При моделюванні повітряна безпілотна платформа на висоті 100 м рухалась зі швидкістю 60 км/год в напрямку користувача, що знаходився в 500 м від БПЛА-вузла. На Рисунку 2.4 показаний результат моделювання каналу та отримана потужність сигналу від БПЛА до UE при скороченні відстані між вузлом та абонентом та врахуванні завмирання сигналу.

Таблиця 2.5

Параметри моделювання каналу БС-користувач

Параметр	Значення
Тривалість симуляції	10 с
Несуча частота	3,5 ГГц
Частота дискретизації	1 ГГц
Потужність передавання	20 дБм
Позиція БПЛА	0, 0, 100 (м)
Швидкість БПЛА	15, 5, 0 (м/с)
Позиція UE	500, 200, 0 (м)
Швидкість UE	-2, 1, 0 (м/с)

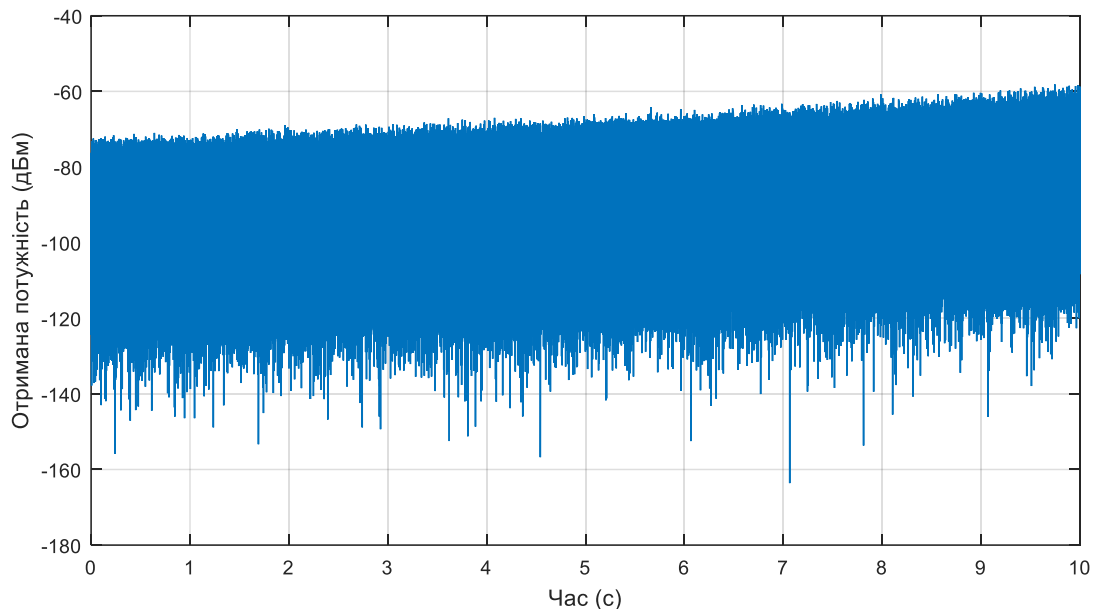


Рис. 2.4. Результат моделювання каналу між рухомими БС та користувачем з врахуванням завмирання сигналу

На відміну від стаціонарної базової станції, повітряна безпілотна платформа може рухатися за висотою, курсом і швидкістю, а сам сигнал проходить через середовище з відбиттями, розсіюванням і завмиранням. У результаті рівень сигналу на приймачі може різко падати або коливатися навіть за короткий час, що ускладнює стабільний зв'язок. Якщо відбувається глибоке завмирання, зростає ймовірність помилок у передаванні даних, повторних передач, затримок і навіть повного розриву сеансу. Це безпосередньо знижує якість обслуговування, особливо для голосового зв'язку, відеопотоків, керування та телеметрії.

Завмирання сигналу в системах зв'язку на основі БПЛА є проблемою не лише через погіршення завадостійкості, а й через вплив на надійність, затримку, енергоефективність і стійкість покриття. Представлена модель призначена для використання в розрахунку оптимального місцерозташування повітряної безпілотної платформи для ефективного обслуговування абонентів. Рішення про необхідність зміни місцерозташування та оптимальне розташування повітряного вузла між абонентами приймається на основі результату попереднього моделювання обчислювальними ресурсами HAPS скупчень абонентів та каналів зв'язку між абонентами і БПЛА-БС з врахуванням завмирань каналу, дозволяючи ефективно використання як енергоресурсу БПЛА, так і телекомунікаційного ресурсу.

## **Висновки до розділу 2**

В розділі представлена математична модель телекомунікаційної мережі із застосуванням повітряних безпілотнох платформ в умовах невизначеності та її обґрунтування.

Визначено ключові параметри інтеграції телекомунікаційних мереж з використанням повітряних безпілотнох платформ та пріоритети для забезпечення якісного зв'язку:

- Підтримка АКМЗ пропускної здатності 1 Мбіт/с для низхідного каналу і 100 кбіт/с для висхідного для забезпечення голосового зв'язку з відповідним рівнем якості;

- Надсилання UE даних про власне місцезнаходження на запит мережі, після підключення до NG-RAN з точністю від 1-3 метрів у приміщенні і до 20-50 метрів на відкритому просторі. За прямої видимості (LOS) у густонаселених міських районах – точність може перевищувати 10 метрів;
- Врахування впливу завмирань сигналу на надійність, затримку, енергоефективність і стійкість покриття АКМЗ.

Представлено основні методи виявлення місцезнаходження БПЛА в телекомунікаційній мережі:

- Запропоновано застосування методу виявлення на основі AoA радіочастотних сигналів між БПЛА, що може працювати в умовах відсутності прямої видимості на частоті 2,4 ГГц, як основного способу виявлення безпілотної повітряної платформи в системі на випадок втрати прямого CNPC-зв'язку між HAPS.
- Метод виявлення на основі комп'ютерного зору, що характеризується в першу чергу низькою вартістю основних оптичних датчиків визначено як допоміжний, тому що функціонує тільки в умовах прямої видимості.

Удосконалено математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем в умовах невизначеності на базі теорії завадозахищеності, яка відрізняється від існуючих тим, що окрім основної завади (адитивний гаусівський шум) враховує завмирання сигналу, що забезпечує заданий рівень достовірності передавання інформації в умовах завад. Модель розроблена з метою її використання в розрахунку оптимального місцерозташування повітряної безпілотної платформи для ефективного обслуговування абонентів. Без врахування завмирань при моделюванні скупчень абонентів та каналів зв'язку між абонентами і БПЛА-БС зростає ймовірність помилок у передаванні даних, повторних передач, затримок і навіть повного розриву сеансу. Це безпосередньо знижує якість обслуговування, особливо для голосового зв'язку, відеопотоків, керування та телеметрії.

### РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

#### 3.1 Оцінка параметрів передачі даних телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ

Базові станції на безпілотних літальних апаратах (БПЛА-БС) мають явні переваги порівняно з традиційними наземними базовими станціями завдяки своїй мобільності, простоті розгортання, економічній ефективності і великому потенціалу для встановлення LoS-з'єднань з наземними UE. Ці характеристики позиціонують БПЛА-БС як невід'ємне доповнення до наземної інфраструктури стільникового зв'язку. БПЛА-БС значно розширюють мережеве покриття, особливо в регіонах, де фіксована інфраструктура недоступна або недостатньо розвинена. Вони особливо цінні в сценаріях реагування на надзвичайні ситуації та катастрофи, коли наземні системи можуть бути пошкоджені або не працювати. У таких випадках БПЛА-БС можуть бути швидко розгорнуті для відновлення послуг зв'язку.

Крім аварійного відновлення, БПЛА-БС також корисні для тимчасових ситуацій з високим трафіком, таких як спортивні заходи або концерти, коли сплески попиту можуть перевантажити існуючу інфраструктуру. Їх гнучкість дозволяє динамічно розподіляти ресурси і управляти транспортним навантаженням в режимі реального часу. Визнаючи потенціал повітряних платформ, 3GPP включив підтримку зв'язку безпілотників у стандарт 5G, забезпечуючи інтероперабельність, управління перешкодами і підвищення мобільності для повітряних користувачів [75].

Крім того, БПЛА-БС виграють від високої ймовірності використання LoS-каналів, що призводить до менших втрат на шляху і зменшення ефекту затінення. Їх робота на великій висоті забезпечує ширше покриття сигналу і більш надійне з'єднання, ніж у наземних аналогів. Це робить БПЛА-БС особливо придатними для таких застосувань, як вивантаження даних, периферійні обчислення та повітряна ретрансляція як у міських, так і в сільських умовах.

Завдяки значно більшій висоті розгортання порівняно з наземними базовими станціями, БПЛА-БС демонструють чіткі характеристики поширення сигналу «повітря-земля», які помітно відрізняються від звичайних наземних каналів зв'язку. Як великомасштабні, так і дрібномасштабні завмирання в повітряному зв'язку були детально проаналізовані в ході вимірювальних кампаній в різних середовищах, включаючи сільські, напівміські та міські райони.

Щоб врахувати ці ефекти, були запропоновані імовірнісні моделі для прогнозування умов LoS і NLoS, засновані на таких факторах, як висота дрону, відстань лінії зв'язку і тип навколишнього середовища. Хоча мобільність БПЛА-БС пропонує значні переваги для розширення покриття і гнучкості мережі, на їх продуктивність також впливають притаманні їм обмеження, зокрема, обмеження потужності і залежність від безпроводового транзитного зв'язку [76]. Тому для ефективного планування, проектування і розгортання стільникових мереж на базі безпілотників необхідне глибоке розуміння компромісів між їхніми перевагами і обмеженнями.

Як і у випадку зі звичайними безпроводовими системами, оцінка продуктивності стільникових мереж за допомогою дронів може бути проведена за допомогою методів моделювання. Однак, через обмежену масштабованість таких методів при збільшенні кількості параметрів мережі, існує очевидна потреба в розробці методів аналітичного моделювання, які б доповнювали імітаційне моделювання.

З огляду на нерівномірний просторовий розподіл БПЛА-БС і UE, стохастична геометрія стає природним і ефективним інструментом для аналізу повітряних мереж. Цей підхід передбачає присвоєння розподілів ймовірностей розташування вузлів і використання цих розподілів для отримання аналітичних виразів для ключових показників продуктивності, таких як покриття і швидкість передачі даних.

Для розробки ефективних протоколів для конкретних застосувань дуже важливо оцінити продуктивність стільникової мережі з інтеграцією безпілотних платформ, беручи до уваги мобільність БПЛА-БС. Двома важливими показниками продуктивності, на які безпосередньо впливає ця мобільність, є ймовірність і

швидкість передачі даних. Крім того, оскільки просторове розташування БПЛА-БС змінюється з часом через їх рух, стає важливим проаналізувати часову поведінку метрик на основі SINR, таких як ймовірність покриття і досяжна швидкість передачі даних, щоб повністю зрозуміти їх вплив на продуктивність мережі [77].

У цьому аналізі використовується модель мобільності БПЛА-БС, розроблена в рамках 3GPP, в якій початкові положення БПЛА-БС визначаються однорідним двовимірним пуассонівським процесом на фіксованій висоті, а кожна БПЛА-БС рухається по прямій лінії у випадковому, незалежному напрямку. Відображаючи практику об'єднання стільників в однорівневих стільникових системах, припускається, що кожен наземний UE підключається до найближчої БПЛА-БС, тоді як всі інші вносять свій внесок як завади.

Рух заважаючих БПЛА-БС відповідає моделі прямолінійної мобільності з постійною швидкістю  $v$  [78]. Розглядаються дві моделі обслуговування для поведінки руху обслуговуючої БПЛА-БС:

- 1) Залежна від UE модель (UE Dependent Model – UDM), в якій БПЛА-БС безперервно рухається до типового UE, а потім зависає безпосередньо над ним на фіксованій висоті. Тобто обслуговуюча БПЛА-БС рухається зі швидкістю  $v$  до цільової точки ( $o'$ ) залишається там нерухомою після її досягнення;
- 2) Незалежна від UE модель (UE Independent Model – UIM), в якій БПЛА-БС рухається у випадковому напрямку, незалежно від положення UE. Інакше кажучи, обслуговуюча БПЛА-БС рухається зі швидкістю  $v$  у випадковому напрямку вздовж прямої траєкторії в межах площини БПЛА-БС.

У UDM-моделі, обслуговуюча БПЛА-БС безперервно рухається до типового користувача і залишається над ним, гарантуючи, що обслуговуюча БПЛА-БС залишається постійною в часі. В результаті в цій моделі не відбувається жодних хендверів. Оскільки UDM мінімізує відстань між БПЛА-БС і користувачем, вона являє собою найкращий сценарій з точки зору безперервності обслуговування.

І навпаки, в UIM-моделі обслуговуюча БПЛА-БС рухається у випадковому напрямку, а отже, може не залишатися найближчою до користувача з плином часу. Це

призводить до можливості виникнення подій хендоверу. Крім того, оскільки передбачається, що місця розташування користувачів є взаємно незалежними, траєкторії БПЛА-БС також є незалежними в обох моделях обслуговування. Ймовірність хендоверу в UIM еквівалентна ймовірності хендоверу в наземній стільниковій мережі, де базові станції є стаціонарними, а UE рухаються по прямих траєкторіях у випадкових напрямках [79].

Розглянемо модель розміщення і руху БПЛА-БС, в якій БПЛА-БС спочатку розміщуються в рівномірно випадкових місцях на фіксованій висоті, а потім починають рухатися з постійною швидкістю у випадкових напрямках вздовж прямих траєкторій [80]. Припускається політика асоціації з найближчим сусідом, коли типовий UE підключається до найближчої БПЛА-БС, визначеної як обслуговуюча БПЛА-БС, тоді як всі інші БПЛА-БС розглядаються як завади.

SIR для типового UE в момент часу  $t$  визначається як:

$$SIR(t) = \frac{h_0(t)r_0(t)^{-\alpha}}{\sum_{x(t) \in \Phi'_D(t)} h_x(t)r_x(t)^{-\alpha}}, \quad (3.1)$$

де  $h_0(t)$  і  $h_x(t)$  – малі коефіцієнти підсилення каналу завмирань, що відповідають відповідно обслуговуючому і заважаючому каналам,  $\alpha$  експонента фіксованих втрат на шляху, а  $\Phi'_D(t) \equiv \Phi_D(t) \setminus x_0(t)$  точковий процес розташування заважаючих БПЛА-БС. Для простоти запису можна позначати знаменник попереднього рівняння як  $I(t)$ . Враховуючи, що канали «повітря-земля» можуть бути схильні до різних рівнів розсіювання, буде змодельовано поведінку завмирань, використовуючи завмирання Накагамі- $m$ , що дозволить врахувати різну інтенсивність завмирань в різних середовищах [81]. Параметри Накагамі- $m$  для обслуговуючої та заважаючої ланок позначаються через  $m_0$  та  $m$ , відповідно. В результаті, відповідні коефіцієнти підсилення каналу,  $h_0(t)$  для обслуговуючої лінії та  $h_x(t)$  для завад, моделюються як гамма-розподілені випадкові величини [82], з наступною функцією густини ймовірності:



$$f_H(h) = \frac{\beta^\beta}{\Gamma(\beta)} h^{\beta-1} e^{-\beta h}, \quad (3.2)$$

де  $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$  – гамма-функція, а  $\beta = m_0$  – для густини ймовірності  $h_0(t)$  і  $\beta = m$  для густини ймовірності  $h_x(t)$ . В інтересах математичної простоти розглядаються цілі значення для  $m_0$  і  $m$ .

Продуктивність мережі оцінюється як за UDM, так і за UIM, використовуючи дві ключові метрики [83]:

- 1) Середня швидкість ( $R(t)$ ): Визначається як  $R(t) = \mathbb{E}[\log(1 + \text{SIR}(t))]$ , де за математичне сподівання береться просторовий розподіл БПЛА-БС (змодельований за допомогою PPP  $\Phi_D$ ) і траєкторії їх руху. Цей вираз представляє середню швидкість передачі даних, яку відчуває типовий користувач в момент часу  $t$ , усереднену для різних реалізацій мережі та мобільності.
- 2) Ймовірність хендоверу ( $P_H(t)$ ) відображає ймовірність того, що хендовер відбувся в момент часу  $t$ .

У UIM, коли відбувається хендовер, БПЛА-БС, яка раніше обслуговувала користувача, після хендоверу стає заважаючою БПЛА-БС. В UIM ця БПЛА-БС не може знову обслуговувати того ж самого користувача. Така поведінка відображає поведінку наземних однорівневих стільникових мереж, де базові станції є стаціонарними і моделюються як однорідний двовимірний пуассонівський точковий процес (Poisson Point Process – PPP), а користувач рухається в рівномірно випадковому напрямку вздовж прямої траєкторії [84].

У таких мережах комірки Вороного, утворені розміщенням БС, є опуклими, що означає, що UE, що рухається по прямолінійній траєкторії, потрапляє в кожну комірку не більше одного разу. Ця властивість справедлива для мережі, де БС розподілені відповідно до однорідного PPP з щільністю  $\lambda_0$ , а UE рухається з постійною швидкістю  $v$  у випадковому напрямку, завжди зв'язуючись з найближчою базовою станцією [85]. Тоді ймовірність хендоверу, з точки зору UE, має вигляд:

$$P_H(t) = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} 2\pi\lambda_0 r \times \\ \times \exp \left\{ -\lambda_0 \left[ r^2 \left( \pi - \varphi_1 + \frac{1}{2} \sin(2\varphi_1) \right) + R^2 \left( \pi - \varphi_2 + \frac{1}{2} \sin(2\varphi_2) \right) \right] \right\} dr d\theta, \quad (3.3)$$

де  $R = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \cos(\theta)}$  – відстань між кінцевим пристроєм (UE) у момент часу  $t$  та базовою станцією (БС) у новому місці, а  $\varphi_1 = \cos^{-1} \left( \frac{v^2 t^2 + r^2 - R^2}{2vtr} \right)$  і  $\varphi_2 = \cos^{-1} \left( \frac{v^2 t^2 + R^2 - r^2}{2vtR} \right)$  – кути в трикутнику, утвореному початковим положенням UE, зміщенням БС  $vt$  та новою відстанню  $R$  між UE і БС. Сценарій проілюстровано на Рисунку 3.1, де трикутниками відмічені БС,  $x_1$  – початкове місцезнаходження UE,  $x_2$  – місцезнаходження UE на момент часу  $t$ .

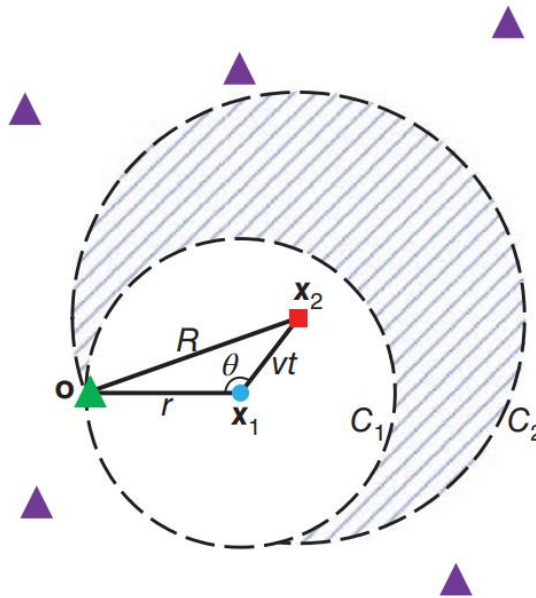


Рис. 3.1. Сценарій моделювання ймовірності хендверу [85]

Таким чином, можна зробити висновок, що ймовірність хендверу в UIM, виражена в попередньому рівнянні, еквівалентна ймовірності хендверу в наземній стільниковій мережі, де базові станції є стаціонарними, а користувачське обладнання – мобільним, незважаючи на те, що в сценарії безпілотної стільникової мережі з мобільними БПЛА-БС і статичними абонентськими пристроями їхні ролі помінялися місцями. Проведений аналіз сценарію рухомої БС, встановленої на БПЛА та стаціонарними користувачами став підґрунтям для моделювання системи,

представленої у подальших розділах роботи. Таким чином, наступним етапом аналізу є точне математичне моделювання енергоспоживання для визначення витрат енергії БПЛА-БС при зміні місцезнаходження з врахуванням параметрів каналу.

### **3.2 Метод визначення енергоспоживання БПЛА для зміни місцезнаходження**

Основною проблемою в реалізації безпроводового зв'язку з інтеграцією БПЛА є обмеженість бортової енергії БПЛА. Хоча розвиток акумуляторних технологій дозволив збільшити час польоту БПЛА, досягнення ефективного використання енергії під час експлуатації залишається важливим для підвищення ефективності зв'язку в рамках фіксованого бюджету на електроенергію [86]. Це призвело до виникнення ключового напрямку досліджень, відомого як енергоефективний БПЛА-зв'язок.

На відміну від звичайних систем, де споживання енергії в першу чергу пов'язане з обробкою сигналів, схемами зв'язку і випромінюванням, БПЛА також несуть значні витрати енергії на рухові установки, необхідні для підтримки польоту і мобільності. Примітно, що споживання енергії на рухові установки зазвичай значно перевищує споживання енергії на функції, пов'язані зі зв'язком [87]. Як наслідок, енергоефективність зв'язку БПЛА передбачає принципово інші міркування порівняно з наземними системами, які в першу чергу зосереджені на мінімізації використання енергії, пов'язаної зі зв'язком.

Точне математичне моделювання енергоспоживання БПЛА є необхідним для оцінки та оптимізації енергоефективного БПЛА-зв'язку. Енергоспоживання БПЛА можна умовно розділити на дві складові: енергія, пов'язана з комунікацією, та енергія, пов'язана з рухом. Що стосується енергії, пов'язаної зі зв'язком, системи БПЛА мають подібне до традиційних наземних систем зв'язку апаратне забезпечення приймачів-передавачів, що дозволяє безпосередньо застосовувати існуючі енергетичні моделі наземних мереж. Однак споживання енергії для руху є особливою характеристикою

систем БПЛА, що робить його унікальним і критичним фактором у контексті телекомунікаційних систем з інтеграцією БПЛА [88].

Модель енергоспоживання БПЛА складається з двох основних компонентів: енергія, пов'язана з комунікацією, включаючи обробку сигналів, схеми та передачу, та енергія руху, яка зазвичай домінує в загальному енергоспоживанні [89]. Ця домінантність виникає тому, що енергія, необхідна для руху може бути на кілька порядків більшою за енергію, необхідну для комунікації. Як результат, оптимізація динаміки польоту та траєкторій має набагато більший вплив на ефективність системи, ніж просто зменшення потужності передачі.

Через фундаментальні відмінності в механіці польоту, БПЛА з нерухомим та обертовим крилом потребують різних математичних моделей для точного розрахунку енергії [90]. Глибоке розуміння їх енергоспоживання є важливим для планування траєкторії, розрахунку часу виконання місії та оптимізації ресурсів, особливо в контексті АКМЗ-мереж 5G. Незважаючи на те, що БПЛА з нерухомим крилом більш енергоефективний за рахунок підйомної сили, що генерується крилами, БПЛА з обертовим крилом все ще є кращим вибором для використання в якості рухомих базових станцій за рахунок їх більшої маневреності, і в зв'язку з цим, кращим можливостям уникати перешкодам та зіткненням з іншими учасниками повітряного руху.

Для БПЛА з фіксованим крилом енергія залежить від таких параметрів, як швидкість, підйомна сила, опір і кривина траєкторії. Безпілотний літальний апарат повинен генерувати достатню підйомну силу, щоб залишатися в повітрі. Опір повітря складається з паразитного опору (через форму і швидкість) та індукованого опору (через генерацію підйомної сили) [91]. Основні аеродинамічні сили, що діють на літак з нерухомим крилом, які складаються з чотирьох основних компонентів: вага ( $W$ ), опір ( $D$ ), підйомна сила ( $L$ ) та тяга ( $F$ ).

Вага ( $W$ ) – це сила тяжіння, що діє на літак у напрямку вниз, розраховується за формулою  $W = mg$ , де  $m$  – загальна маса літака (включаючи корисне навантаження), а  $g$  – прискорення вільного падіння. Опір ( $D$ ) – це сила, що діє вздовж напрямку повітряного потоку, протидіючи руху літака, особливо за відсутності вітру. Опір

представляє аеродинамічний опір, що виникає під час польоту. Підйомна сила ( $L$ ) – це сила, що діє перпендикулярно до напрямку опору, зазвичай спрямована вгору і відповідає за протидію вазі літака. Тяга ( $F$ ) – це сила, спрямована вперед, що створюється двигуном літака і необхідна для подолання опору та забезпечення тривалого руху вперед.

Для літака з нерухомим крилом, що рухається з дозвуковою швидкістю  $V$ , опір  $D$  можна виразити у простій формі як [92]:

$$D = c_1 V^2 + \frac{c_2 \kappa^2}{V^2}, \quad (3.4)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – параметри, що залежать від декількох характеристик літака, включаючи вагу, площу крила, щільність повітря, ефективність розмаху крила та співвідношення сторін, останнє є відношенням розмаху крила до довжини його аеродинамічної хорди. Параметр  $\kappa \triangleq L/W$  – коефіцієнт навантаження, що представляє собою відношення підйомної сили до ваги.

Для БПЛА з обертовим крилом, до яких належать квадрокоптери, вертольоти тощо, енергія натовість моделюється на основі профілю лопатей (потужність, необхідна для подолання тертя лопатей), індукованої потужності (потужність для створення підйомної сили) та паразитної потужності (потужність для подолання опору повітря корпусу під час руху). Загальне споживання енергії можна виразити так:

$$P_{\text{оберт.}}(V) = P_0 \left( 1 + \frac{3V^2}{U_{\text{лоп.}}^2} \right) + P_i \left( \sqrt{1 + \frac{V^4}{4v_0^4}} - \frac{V^2}{v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A V^3 \quad (3.5)$$

де  $P_0$  – потужність профілю лопаті,  $P_i$  – індукована потужність (у режимі зависання),  $U_{\text{лоп.}}$  – швидкість кінчика лопаті,  $v_0$  середня індукована швидкість ротора, а  $d_0$ ,  $\rho$ ,  $s$ ,  $A$  – фізичні параметри (опір, щільність повітря, площа тощо).

Зліт споживає постійну потужність, але горизонтальний політ може бути більш енергоефективним при оптимальних швидкостях. Існує мінімальна швидкість потужності  $V_{\text{mr}}$  і енергооптимальна швидкість  $V_{\text{me}}$ , як правило, в діапазоні 10-15 м/с для невеликих квадрокоптерів. Порівняння параметрів літальних апаратів з фіксованим та обертовим крилом наведено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Порівняння літальних апаратів з фіксованим та обертовим крилом

Параметр	Фіксоване крило	Обертове крило
Зависання	Неможливо	Можливо (з більшими витратами енергії)
Ефективна швидкість	Вища (приблизно 20-40 м/с)	Нижча (приблизно 10-15 м/с)
Витрати енергії	Нижчі в довготривалих місіях	Вищі у випадку зависання
Маневреність	Обмежена (постійний рух вперед)	Висока (здатність руху у будь-якому напрямку)

Метою максимізації енергоефективності є збільшення кількості бітів, що передаються на одиницю енергії, що можна сформулювати так:

$$EE(q(t), r(t)) = \frac{R(q(t), r(t))}{E(q(t)) + E_{\text{пер.}}(r(t))} \quad (3.6)$$

де  $q(t)$  – траєкторія БПЛА, а  $r(t)$  – розподіл ресурсів зв'язку.

З мінімізацією енергії в умовах обмежень зв'язку потрібно мінімізувати загальне споживання енергії, одночасно задовольняючи фіксовані вимоги до швидкості/обсягу передачі даних. Час виконання стає змінним, що робить задачу неконвексною, а оптимізація стає чутливою до динаміки польоту БПЛА і залежить від умов каналу, що залежать від місця розташування [93]. Можливим рішенням може бути використання протоколу «політ-зависання-передача», який передбачає відвідування БПЛА декількох оптимізованих місць, зависання для зв'язку і політ між ними з оптимальною швидкістю. Алгоритм обчислення оптимального маршруту з врахуванням траєкторії та виділення комунікаційних ресурсів наведено в Додатку А.

Протокол «політ-зависання-передача» є майже оптимальною стратегією для безпілотних літальних апаратів з обертовим крилом, яка дозволяє мінімізувати споживання енергії і водночас задовольнити вимоги до передачі даних. Як впливає з назви, стратегія передбачає три етапи, перший з яких полягає у визначенні оптимальних точок зависання, а точніше, точок, де канал зв'язку з наземним користувачем є стабільним (тобто близьким, з чіткою прямою видимістю) і БПЛА може передавати дані швидко і з низьким енергоспоживанням. Це часто передбачає розміщення з урахуванням каналу зв'язку на меншій висоті і під прямим кутом прямої видимості, уникаючи перешкод або зон з високим рівнем перешкод. Другий крок полягає в плануванні енергоефективних траєкторій польоту, використовуючи мінімальну швидкість між точками маршруту, уникаючи крутих поворотів або раптових прискорень і дотримуючись прямих відрізків або плавних траєкторій. Енергія польоту на цьому етапі мінімізується шляхом вибору маршрутів з невеликою кількістю крутих поворотів і стабільного польоту з оптимальною крейсерською швидкістю. Третій крок полягає в оптимізації часу зависання шляхом обчислення тривалості зависання та передачі, щоб задовольнити вимоги до зв'язку та мінімізувати загальну енергію (для польоту, зависання та передачі). Це стає проблемою розподілу часу з обмеженнями зв'язку. Варто також зазначити, що більш енергоефективним є зависання і передача на близькій відстані (сильний сигнал), навіть якщо це означає витратити більше часу на зависання, порівняно з передачею під час польоту далеко від користувача на високій потужності [94].

У сценаріях зв'язку з використанням БПЛА енергія споживається як БПЛА, так і наземним терміналом під час зв'язку. БПЛА споживає енергію для підтримки положення або руху (енергія руху) та передачі/прийому (енергія зв'язку). Наземний користувач у цьому випадку використовує енергію тільки для зв'язку. Компроміс між енергоспоживанням БПЛА та наземного терміналу полягає у збалансуванні цих двох джерел енергоспоживання з метою оптимізації загального енергоспоживання всієї системи або надання пріоритету одній зі сторін (наприклад, економія енергії БПЛА за рахунок наземного користувача або навпаки) [95]. Отже, чим ближче БПЛА знаходиться до наземних користувачів, тим менше енергії потрібно користувачам, але

тим більше енергії споживає БПЛА. Оптимізація передбачає спільне регулювання потужності передачі наземного користувача, швидкості БПЛА та траєкторії для збалансування цього компромісу. Зважена сума мінімізації енергоспоживання БПЛА та наземного користувача може бути виражена як:

$$\min_{q(t), r(t)} \alpha \cdot E_{\text{БПЛА}} + (1 - \alpha) \cdot E_{\text{назем.}} \quad (3.7)$$

де  $E_{\text{БПЛА}} = \int P_{\text{рух}}(t) + P_{\text{пер.}}^{\text{БПЛА}}(t)dt$ ,  $E_{\text{назем.}} = \int P_{\text{пер.}}^{\text{БС}}(t)dt$ ,  $\alpha \in [0,1]$  контролює пріоритет. При  $\alpha = 1$ : UAV енергія БПЛА є більш важливою,  $\alpha = 0$ : енергія наземних засобів є більш важливою, а  $\alpha = 0,5$ : баланс між обома.

У 5G АКМЗ безпілотні літальні апарати можуть слугувати носіями даних для датчиків IoT, повітряними ретрансляторами для користувачів у надзвичайних ситуаціях або літаючими базовими станціями для віддалених терміналів. У цих ролях:

- IoT-датчики можуть бути обмежені в енергії, і необхідно надати пріоритет мінімізації енергії на землі;
- БПЛА в районах стихійних лих можуть бути обмежені в батареях, тому енергія БПЛА буде в більшому пріоритеті;
- В інших випадках ідеальним є збалансований компроміс.

Компромісні стратегії оптимізації траєкторії та енергоефективності показані в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

#### Ключові стратегії компромісних рішень застосування

Стратегія	Вплив на БПЛА	Вплив на наземні вузли	Сценарій застосування
Зависання близько до наземного користувача	Високі витрати енергії	Необхідна низька потужність передачі	Датчики мають обмежену ємність батареї
Високий або швидкий політ	Низькі витрати енергії	Необхідна висока потужність передачі	Тривалість роботи БПЛА є критично важливою
Динамічне коригування траєкторії	Помірні витрати енергії	Помірна потужність передачі	Збалансований сценарій енергоспоживання
Кластеризація користувачів	Зменшення витрат енергії на переміщення	Розподіл витрат на передачу між вузлами	Розгортання на великій території



Таким чином, спільна оптимізація траєкторії БПЛА та управління енергією на обох кінцях призводить до подовження місії БПЛА, зменшення перебоїв у роботі наземних станцій та ефективної, стійкої роботи мережі. Оптимізація Парето може бути використана для пошуку робочих точок, де енергія БПЛА та наземних станцій не може бути покращена без погіршення іншої [96]. У підсумку, щоб зменшити споживання енергії, зберігаючи при цьому продуктивність зв'язку в наземній мережі 5G з інтеграцією БПЛА, необхідно врахувати наступні моменти:

1. Використання точних моделей енергії руху:

- Застосовування окремі моделі енергії для БПЛА з фіксованим і обертовим крилом;
- Врахування коригування 3D траєкторії (наприклад, зміни висоти впливають на підйомну силу/опір).

2. Оптимізація траєкторії руху та комунікації:

- Оптимізація як траєкторії руху ( $q(t)$ ), так і розподілу потужності/ресурсів ( $r(t)$ );
- Використання таких методів, як послідовне опукле наближення (SCA) та блоковий координатний спуск (Block Coordinate Descent – BCD).

3. Впровадження протоколу «політ-зависання-передачі» для безпілотних літальних апаратів з обертовим крилом:

- Планування дискретних точок зависання;
- Використання мінімальної швидкості енергії ( $V_{mr}$ ) між точками;
- Оптимізація тривалості зависання для ефективного задоволення вимог до даних.

4. Управління компромісами:

- У місіях зі збору даних потребується оцінка компромісів між енергією на землі та енергією БПЛА;
- Використання оптимізації Парето для знаходження енергоефективних робочих точок для обох сторін.

5. Оптимізація LoS в міських/АКМЗ середовищах:

- Розгляд ймовірнісних моделей LoS, на які впливають висота над рівнем моря та навколишнє середовище;
- Адаптація висоти над рівнем моря та радіусу у кругових або фігурних траєкторіях для максимізації надійності зв'язку та зменшення кількості повторних передач.

6. Спрощення траєкторії для розгортання в режимі реального часу для АКМЗ-сценаріїв, де глобальна оптимізація є недоцільною:

- Використання заздалегідь обчислених ефективних траєкторій (наприклад, «вісімки» або кругової);
- Зменшення складності шляхом обмеження оновлення траєкторії до важливих.

В результаті аналізу визначено, що енергія, необхідна для зміни місцезнаходження може бути на кілька порядків більшою за енергію, необхідну для комунікації. Таким чином, оптимізація динаміки польоту та траєкторії має набагато більший вплив на ефективність системи, ніж зменшення потужності передачі і тому метод підвищення енергоефективності БПЛА-БС буде зосереджений на оптимізації визначення оптимального місцезнаходження вузла для обслуговування наземних користувачів. Метод враховуватиме параметри каналу, враховуючи адитивний гаусівський шум, доплерівський зсув та завмирання сигналу.

### **3.3 Метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-БС для обслуговування наземних користувачів**

Розглянемо набір  $N$  UE з індексами  $i \in \{1, \dots, N\}$ , що характеризуються часом  $t_0$  в місцеположеннях  $\mathbf{p}_i(t_0) \in \mathbb{R}^3$  та швидкістю  $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^3$ , і два БПЛА з встановленими БС з індексами  $k \in \{1, 2\}$ , що розташовані в позиціях  $\mathbf{q}_k(t_0)$ . Кожен БПЛА працює на фіксованій висоті  $H$ , та обмежений максимальною швидкістю  $v_{\max}$  і радіусом покриття  $R_c$ . Система має на меті визначити місцезнаходження кінцевих абонентів та максимізувати кількість обслуговуваних користувачів, мінімізуючи споживання енергії БПЛА та враховуючи параметри каналу зв'язку.

Першим кроком системи є передбачення руху UE на горизонті планування  $T_{\text{pr}}$ , використовуючи модель постійної швидкості:

$$\hat{\mathbf{p}}_i = \mathbf{p}_i(t_0) + \mathbf{v}_i T_{\text{pred}}, \quad \forall i \quad (3.8)$$

Кожному UE надається наступна вага за важливістю обслуговування БПЛА-БС:

$$w_i = \pi_i \left( 1 + \frac{\gamma_i^{\text{req}}}{\max_j \gamma_j^{\text{req}}} \right) \frac{1}{1 + \|\mathbf{v}_i\|} \quad (3.9)$$

де  $\pi_i$  – пріоритет UE,  $\gamma_i^{\text{req}}$  – необхідний SINR для обслуговування, та  $\mathbf{v}_i$  – горизонтальна швидкість UE. Принцип призначення важливості обслуговування UE полягає в можливості його обслуговування базовою станцією та БПЛА і швидкості UE. Передбачені місцезрештування UE поділяються на кластери за методом k-середніх:

$$\min_{\{C_1, C_2\}, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2} \sum_{k=1}^2 \sum_{i \in C_k} w_i \|\hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{c}_k\|^2 \quad (3.10)$$

де центри кластерів визначаються як:

$$\mathbf{c}_k = \frac{\sum_{i \in C_k} w_i \hat{\mathbf{p}}_i}{\sum_{i \in C_k} w_i} \quad (3.11)$$

Центри кластерів призначаються до БПЛА через мінімізацію відстані, що потрібно подолати БПЛА:

$$\min_{\sigma} \sum_{k=1}^2 \|c_{\sigma(k)} - \mathbf{q}_k(t_0)\| \quad (3.12)$$

де  $\sigma$  – перестановка множини  $\{1, 2\}$ . Кожен БПЛА може подолати відстань:

$$D_{\max} = v_{\max} T_{\text{move}} \quad (3.13)$$

Тому можлива відстань до цілі БПЛА отримується через проєкцію:

$$\mathbf{q}_{k,\text{tar}} = \mathbf{q}_k(t_0) + \min\left(1, \frac{D_{\max}}{\|\mathbf{c}_k - \mathbf{q}_k(t_0)\|}\right) \quad (3.14)$$

Коефіцієнт передбачуваного каналу з врахуванням доплерівського зсуву:

$$h_{k,i} = \rho_{k,i} h_{k,i}(t_0) + \sqrt{1 - \rho_{k,i}^2} z_{k,i} \quad (3.15)$$

де  $\rho_{k,i} = J_0(2\pi f_{D,k,i} T_{\text{pred}})$ , та  $f_{D,k,i} = \frac{\|\mathbf{v}_i\|}{\lambda}$ .

Отримана потужність визначається як:

$$P_{r,k,i} = P_t + G_t + G_r - L_{k,i}^{\text{FSPL}} + 20 \log_{10}|h_{k,i}| \quad (3.16)$$

де  $L_{k,i}^{\text{FSPL}}$  – втрати у вільному просторі:

$$L_{k,i}^{\text{FSPL}} = 32,4 + 20 \log_{10}(f_c) + 20 \log_{10}(d_{k,i}) \quad (3.17)$$

Відношення сигналу до шуму та інтерференції, за умови ортогонального розподілу ресурсів:

$$\gamma_{k,i} = P_{r,k,i} - N_0 \quad (3.18)$$

де  $N_0 = -174 + 10 \log_{10}(B) + \text{NF}$ .

UE визначається таким, що знаходиться в межах зони обслуговування БПЛА-БС  $k$  за умови:

$$\|\hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{q}_{k,\text{tar}}\| \leq R_c \quad (3.19)$$

та таким, що може обслуговуватись БПЛА-БС  $k$  тільки за виконанням умови:

$$\gamma_{k,i} \geq \gamma_i^{\text{req}} \quad (3.20)$$

Результатом роботи алгоритму є позиції БПЛА  $\mathbf{q}_{1,\text{tar}}$ ,  $\mathbf{q}_{2,\text{tar}}$ , значення SINR  $\gamma_{k,i}$  для UE, що обслуговуються, та відстань, що повинні подолати БПЛА  $D_k = \|\mathbf{q}_{k,\text{tar}} - \mathbf{q}_k(t_0)\|$ . Таким чином, метод балансує між трьома обмежуючими факторами: максимізація покриття максимальної кількості користувачів, забезпечення якості каналу зв'язку за SINR та енергоефективність БПЛА за рахунок обмеження їх руху.

Моделювання системи передбачало 10 випадково розташованих UE в зоні 600 м, що рухаються в випадковому напрямку та з випадковою швидкістю  $\{1,5; 4,5\}$  м/с. В моделюванні розглядався обмежений сценарій, в якому цих абонентів повинні були забезпечити покриттям дві БПЛА-БС, що працюють на висоті 120 м та розташовані поруч один з одним на початку симуляції. В Таблиці 3.3 наведені параметри, що використовувались при моделюванні сценарію.

Таблиця 3.3

Параметри моделювання алгоритму пошуку оптимального місцезнаходження БПЛА-БС з врахуванням параметрів передбачуваного каналу зв'язку між UE

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Несуча частота	$f_c$	3,5 ГГц	Частота 5G
Смуга пропускання	$B$	20 МГц	Використовується для вимірювання потужності шуму
Коефіцієнт шуму	NF	7 дБ	Коефіцієнт шуму приймача
Потужність передачі на БС	$P_t$	30 дБм	БС, що встановлена на БПЛА

Параметри моделювання алгоритму пошуку оптимального місцезнаходження БПЛА-БС з врахуванням параметрів передбачуваного каналу зв'язку між UE

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Коефіцієнт підсилення антени БС	$G_t$	5 дБі	Підсилення антени бортової БС
Коефіцієнт підсилення антени UE	$G_r$	0 дБі	Підсилення антени абонентського обладнання
Висота БПЛА	$H$	120 м	Фіксована висота
Тривалість симуляції	$T_{\text{pred}}$	30 с	Використовується для передбачення місцезнаходження UE
Максимальна швидкість БПЛА	$v_{\text{max}}$	12 м/с	Обмеження досяжності цілі для БПЛА
Кількість	$N$	10	Розташовані випадковим чином в зоні симуляції
Довжина сторін зони симуляції	-	600 м	Квадратна зона з координатами від -300 до 300
Позиція БПЛА-БС1	$\mathbf{q}_1(t_0)$	-150, 0 (м)	Позиція до відпрацювання алгоритму
Позиція БПЛА-БС2	$\mathbf{q}_2(t_0)$	150, 0 (м)	Позиція до відпрацювання алгоритму
Швидкість UE	$\mathbf{v}_i$	{1,5; 4,5} (м/с)	Випадкове значення

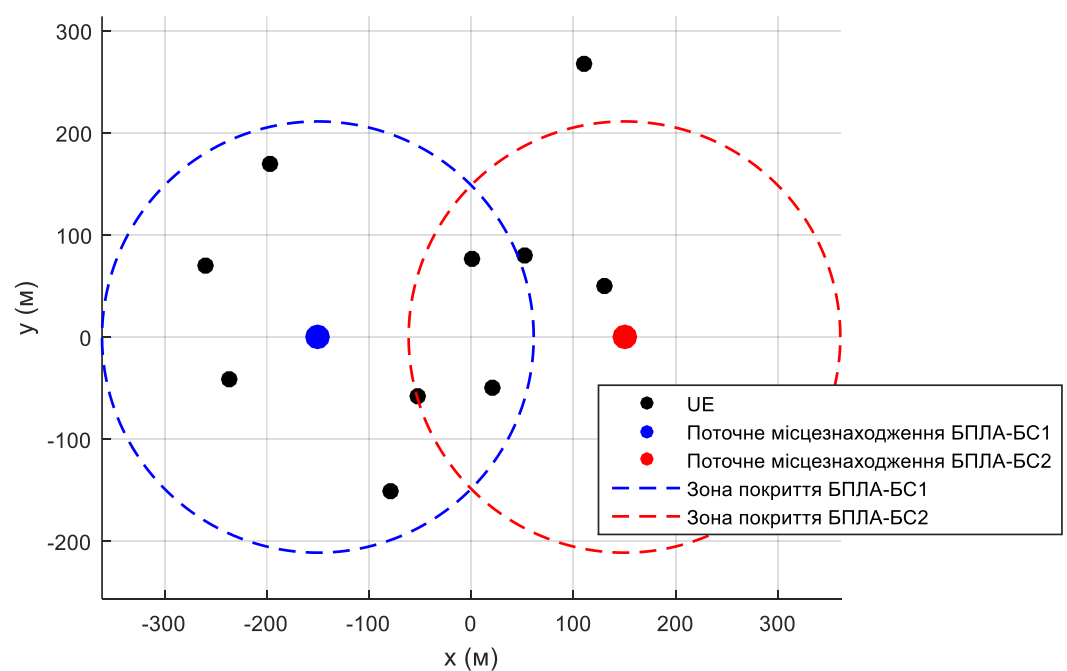


Рис. 3.2. Розташування вузлів до початку роботи алгоритму

На Рисунку 3.2 показано стан мережі до відпрацювання алгоритму з початковими позиціями абонентського обладнання та БПЛА-БС, стан мережі після роботи алгоритму показано на Рисунку 3.3. Показники енергії, витраченої на зміну місцезнаходження показані на Рисунку 3.4 та Рисунку 3.5.

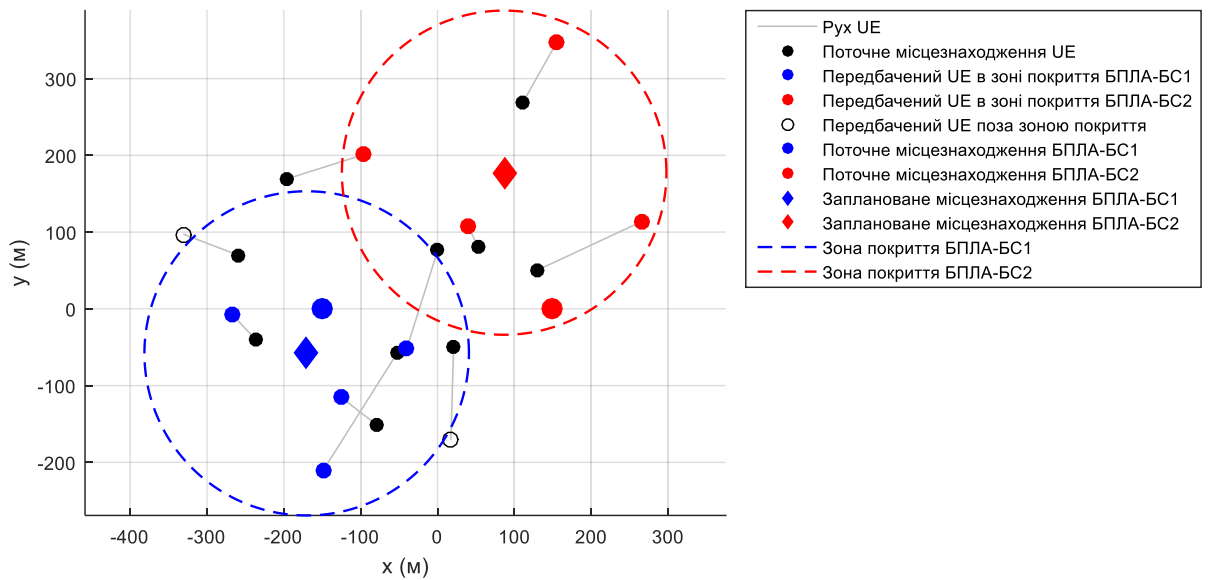


Рис. 3.3. Розташування вузлів за результатом роботи пропонованого алгоритму

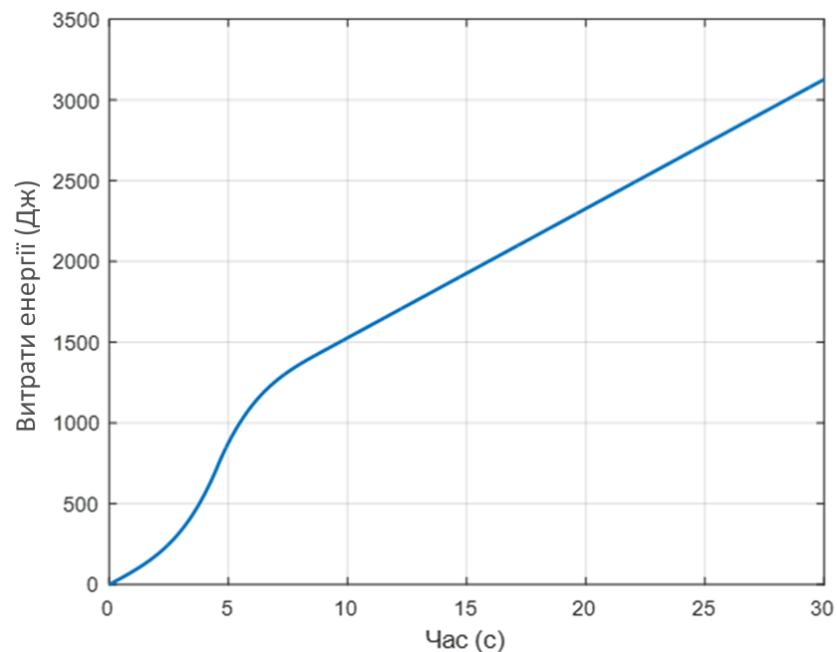


Рис. 3.4. Енергія, витрачена на зміну місцезнаходження БПЛА-БС1

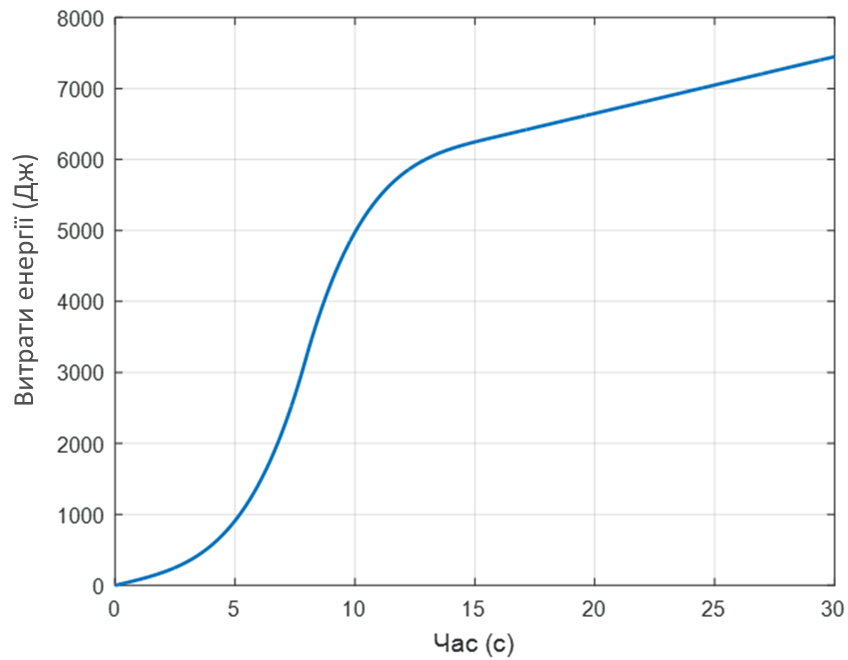


Рис. 3.5. Енергія, витрачена на змiну місцезнаходження БПЛА-БС2

Первинне моделювання включало запуск симуляції на 100 циклів. Метод показав орієнтовний результат в 90,7% покриття користувачів, з врахуванням енергоефективності БПЛА. Результати первинної симуляції показані в Таблиці 3.4. Для подальшої оцінки методу та його порівняння з існуючими симуляціями була обрана вибірка в 1000 циклів.

Таблиця 3.4

Результати первинної симуляції з вибіркою в 1000 циклів

Кількість UE в зоні обслуговування однієї з БПЛА- БС	Кількість циклів
10	31
9	44
8	19
7	5
6	1

Повне покриття всіх абонентів в зоні відповідальності БПЛА не передбачається методом, оскільки метод пріоритизує обслуговування відносно нерухомих груп



абонентів, віддаючи перевагу надання послуг абонентам, що рухаються повільно, або у напрямку, що відповідає запланованому місцезнаходженню БПЛА-БС.

Для порівняння методу був обраний існуючий метод координації БПЛА-БС, запропонований в [97], що передбачає використання навчання з підкріпленням, за моделлю «актор-критик» з перевагою (Advantage Actor-Critic – A2C) на основі довгої короткочасної пам'яті (Long Short-Term Memory – LSTM), що доповнена механізмом уваги. Алгоритм розроблено для забезпечення покриття в мережевій інфраструктурі в аварійному стані з забезпеченням максимально справедливого покриття для випадково розподілених наземних користувачів в умовах жорстких енергетичних обмежень. Справжня ефективність моделі може відрізнятись, оскільки її реалізація потребує навченої нейронної мережі.

Метод був застосований в умовах, представлених раніше для першого методу. Перша відмінність методу від попереднього це використання іншої моделі пересування БПЛА. Кожен крок ітерації БПЛА  $k$  обирає одну з дій з дискретного набору:

$$A = \{(0,1), (1,1), (1,0), (1, -1), (0, -1), (-1, -1), (-1,1), (0,0)\} \quad (3.21)$$

що відповідає восьми напрямкам руху та зависання в повітрі. Після того, як БПЛА оновлюють своє місцезнаходження, мережа призначає кожен UE до БПЛА з найбільшим коефіцієнтом корисності:

$$u_{k,i}[s] = 1_{k,i}[s](w_1(\gamma_{k,i}[s] - \gamma_i^{\text{req}}) + w_2 1_{\{i \notin S[s]\}} - w_3 T_i[s]) \quad (3.22)$$

де  $1_{k,i}[s]$  дорівнює 1, якщо UE  $i$  може обслуговуватись БПЛА  $k$ ;  $T_i[s]$  – сумарний час обслуговування UE  $i$ ;  $S[s]$  – набір користувачів, що вже обслуговувались раніше. Призначений БПЛА визначається як:

$$k_i^*[s] = \arg \max_{k \in \{1,2\}} u_{k,i}[s] \quad (3.23)$$

Якщо максимальна корисність від'ємна або недосяжна, UE залишиться поза зоною обслуговування на поточному кроці ітерації. Головна відмінність методу це використання винагороди за вибір дії. Контролер оцінює всі дії-кандидати для кожного БПЛА та обирає одну з них за наступним критерієм:

$$R[s] = \lambda_1 N_{\text{new}}[s] + \lambda_2 J[s] - \lambda_3 \text{CDI}[s] - \lambda_4 E_{\text{step}}[s] - \lambda_5 1_{\text{viol}}[s] \quad (3.24)$$

де  $N_{\text{new}}[s]$  – кількість користувачів, що не обслуговувались мережею;  $J[s]$  – індекс справедливості Джейна;  $\text{CDI}[s]$  – індекс нерівності покриття;  $E_{\text{step}}[s] = P_k[s]\Delta t$  – використана БПЛА енергія за поточний крок;  $1_{\text{viol}}[s]$  – штраф за вихід за межі зони, визначеної для БПЛА. Індекс справедливості обчислюється як:

$$J[s] = \frac{(\sum_{i=1}^N T_i[s])^2}{N \sum_{i=1}^N T_i^2[s] + \varepsilon} \quad (3.25)$$

Показник просторової справедливості можна виразити за допомогою частки охоплення за квадрантами:

$$\text{CDI}[s] = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{q=1}^4 (p_q[s] - \bar{\rho}[s])^2}, \quad \bar{\rho}[s] = \frac{1}{4} \sum_{q=1}^4 p_q[s] \quad (3.26)$$

де  $p_q[s]$  – коефіцієнт обслуговування користувачів у квадранті  $q$ . На кожному  $s$ , алгоритм виконує наступні дії:

- 1) Передбачення положення UE  $\mathbf{u}_i[s]$ .
- 2) Оновлення станів завмирання.
- 3) Для кожного БПЛА  $k$ : перевірка кожної дії  $a \in A$ .
- 4) Обчислення отриманої винагороди  $R[s]$ .
- 5) Вибір дії з максимальною  $R[s]$ .
- 6) Оновлення положення, потужність та енергію БПЛА.
- 7) Перерахунок статистики розподілу, справедливості та обслуговування.

Це створює систему управління із замкнутим контуром та рухомим горизонтом, яка постійно коригує траєкторії безпілотних літальних апаратів відповідно до переміщень користувача та якості обслуговування. Результат відпрацювання методу за параметрами, що перелічені в Таблиці 3.3 показано на Рисунку 3.6.

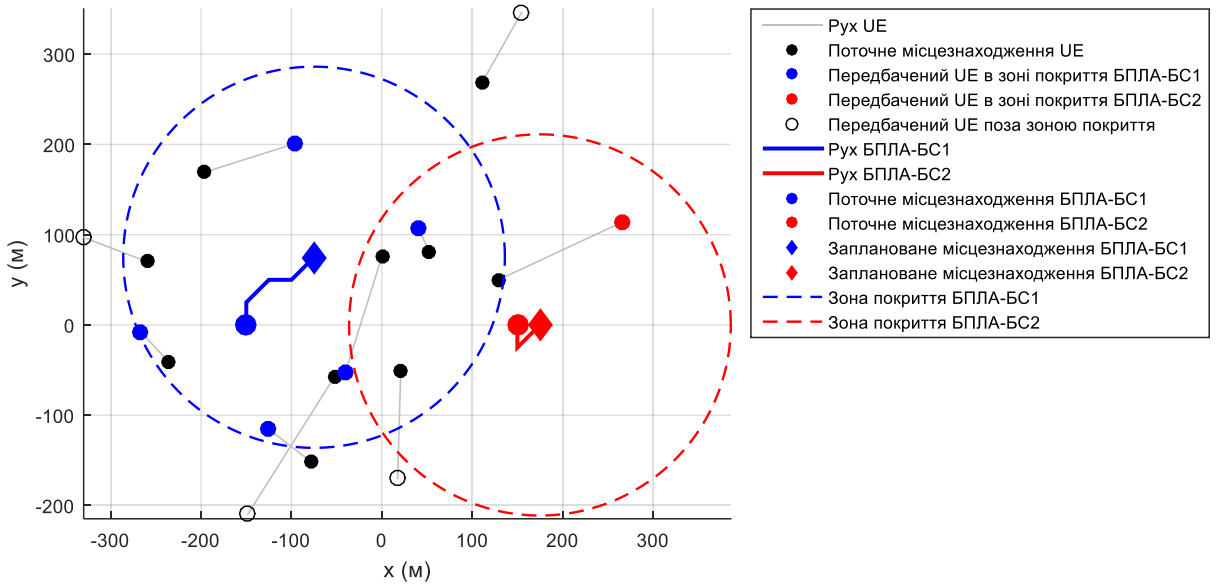


Рис. 3.6. Розташування вузлів за результатом роботи алгоритму з використанням підходу LSTM-A2C

Третій метод пропонується в [98], та заснований на принципі відносної відстані (Relative Distance – RD), основна ідея якого полягає в тому, щоб поставити за мету повне покриття, розділити зону виконання завдання на кілька секторів, які необхідно забезпечити покриттям, а після чого БПЛА-БС переміщуються під впливом RD від непокритих секторів, для максимального зменшення кількості непокритих секторів. Головна відмінність цього методу від першого методу це використання ітеративної моделі руху на основі відносної відстані. На кожному кроці ітерації БПЛА  $k$  зазнає три складові руху:

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{F}_k^{\text{cov}} + \mathbf{F}_k^{\text{uav}} + \mathbf{F}_k^{\text{bd}} \quad (3.27)$$

де  $\mathbf{F}_k^{\text{cov}}$  – коефіцієнт орієнтації БПЛА  $k$  на основі покриття;  $\mathbf{F}_k^{\text{uav}}$  – коефіцієнт відштовхування від сусідніх БПЛА;  $\mathbf{F}_k^{\text{bd}}$  – коефіцієнт відштовхування від меж зони роботи БПЛА. Нехай  $U^{(n)}$  – множина неперекритих точок сітки на ітерації  $n$ , тобто:

$$U^{(n)} = \left\{ \mathbf{g}_m : \min_j \left\| \mathbf{g}_m - \mathbf{u}_j^{(n)} \right\| > R \right\} \quad (3.28)$$

Тоді коефіцієнт орієнтації БПЛА  $k$  на основі покриття:

$$\mathbf{F}_k^{\text{cov}} = \sum_{\mathbf{g}_m \in U^{(n)} \cap S_k} w_m \frac{\mathbf{g}_m - \mathbf{u}_k^{(n)}}{\left\| \mathbf{g}_m - \mathbf{u}_k^{(n)} \right\| + \varepsilon} \exp \left( - \frac{\left\| \mathbf{g}_m - \mathbf{u}_k^{(n)} \right\|}{R_s} \right) \quad (3.29)$$

де  $S_k$  – область зондування БПЛА  $k$ ,  $R_s$  – радіус зондування, а  $\varepsilon$  дозволяє уникнути ділення на нуль. Щоб уникнути перекриття та зіткнення в одній точці, БПЛА  $k$  відштовхується сусідніми БПЛА:

$$\mathbf{F}_k^{\text{uav}} = \sum_{j \neq k} \mathbb{I} \left( \left\| \mathbf{u}_k^{(n)} - \mathbf{u}_j^{(n)} \right\| < d_{\text{th}} \right) \frac{\mathbf{u}_k^{(n)} - \mathbf{u}_j^{(n)}}{\left\| \mathbf{u}_k^{(n)} - \mathbf{u}_j^{(n)} \right\| + \varepsilon} \exp \left( - \frac{\left\| \mathbf{u}_k^{(n)} - \mathbf{u}_j^{(n)} \right\|}{d_{\text{th}}} \right) \quad (3.30)$$

де  $d_{\text{th}}$  – відстань між БПЛА. Якщо БПЛА  $k$  наближається до межі зони виконання завдання, він відштовхується назад:

$$\mathbf{F}_k^{\text{bd}} = \sum_{b \in \partial \Omega} \mathbf{n}_b \exp \left( - \frac{\delta_{k,b}}{R} \right) \quad (3.31)$$

де  $\delta_{k,b}$  – відстань до сегменту межі зони  $b$ , а  $\mathbf{n}_b$  – одинична норма, спрямована всередину. Результат моделювання методу за параметрами, представленими в Таблиці 3.3 показано на Рисунку 3.7.

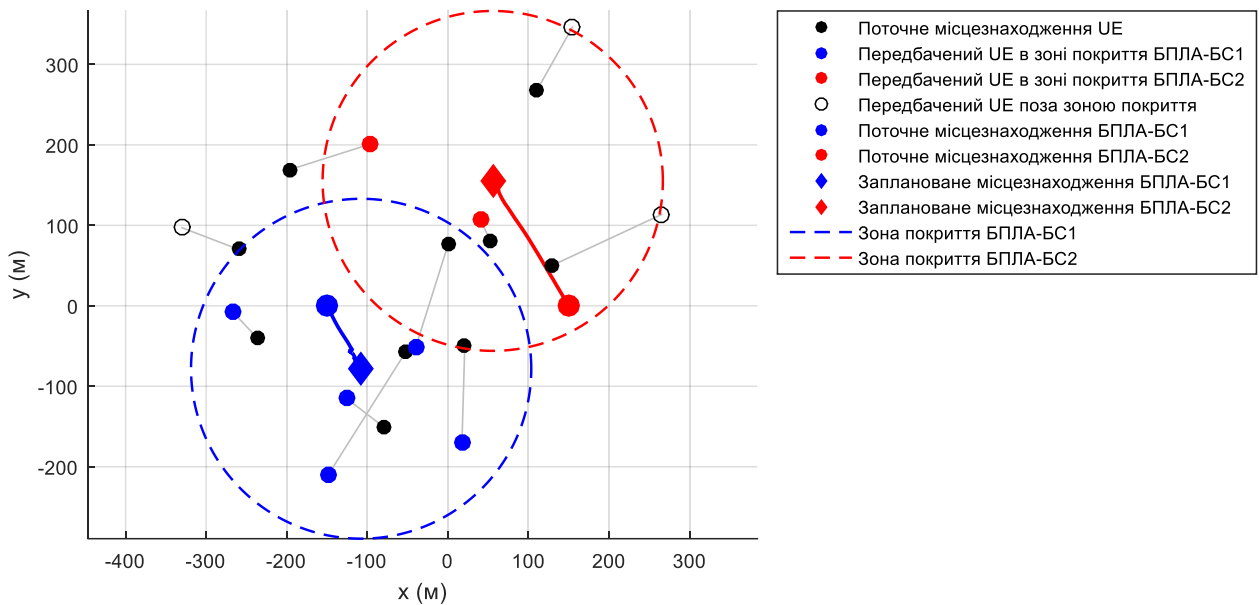


Рис. 3.7. Розташування вузлів за результатом роботи алгоритму з використанням підходу на основі відносної відстані

Порівняння методів було проведено через симуляцію 1000 сценаріїв та визначення середніх величин чотирьох основних показників: витрати енергії на зміну місцезнаходження вузла, максимальна кількість користувачів в зоні покриття, середня кількість користувачів в зоні покриття та кількість користувачів в зоні покриття на момент кінця симуляції. Тривалість кожної симуляції становила 30 секунд. Результати порівняння наведено на Рисунку 3.8 та Рисунку 3.9.

За результатами симуляції можна зробити наступні висновки:

- 1) Метод на основі LSTM-A2C найбільш ефективний, якщо метою є забезпечення покриттям максимальної кількості UE. Це в першу чергу досягається за рахунок винагород, що визначають найбільшим пріоритетом саме користувачів, що не обслуговувались мережею раніше.
- 2) Метод на основі відносної відстані є найбільш ефективним, якщо метою є забезпечення стабільного покриття і енергоефективність не є пріоритетом.
- 3) Пропонований метод показав найкращий результат енергоефективності, зменшуючи середню якість покриття лише на 4%, та збільшуючи енергоефективність на 50,76% в порівнянні з методом на основі LSTM-A2C, та на 28,87% в порівнянні з методом на основі відносної відстані.

Хоча методи на основі LSTM-A2C та на основі відносної відстані забезпечують покриття абонентів з більшою точністю, їх застосування в потребує більшого енергоспоживання, що є неприйнятним в сценаріях, що передбачають умови невизначеності. Особливість розробленого методу полягає в передбаченні місцезнаходження абонентів протягом визначеного часу, що дозволяє підвищити точність прийняття рішення про зміну місцезрештування повітряної безпілотної платформи з врахуванням параметрів каналу. Таким чином, розроблений метод зменшує якість покриття на 4%, зменшуючи зменшити енергоспоживання в 1,4 рази, що дозволяє збільшити час виконання оперативного завдання БПЛА-БС при розгортанні реальної мережі з застосування повітряних безпілотної платформ.

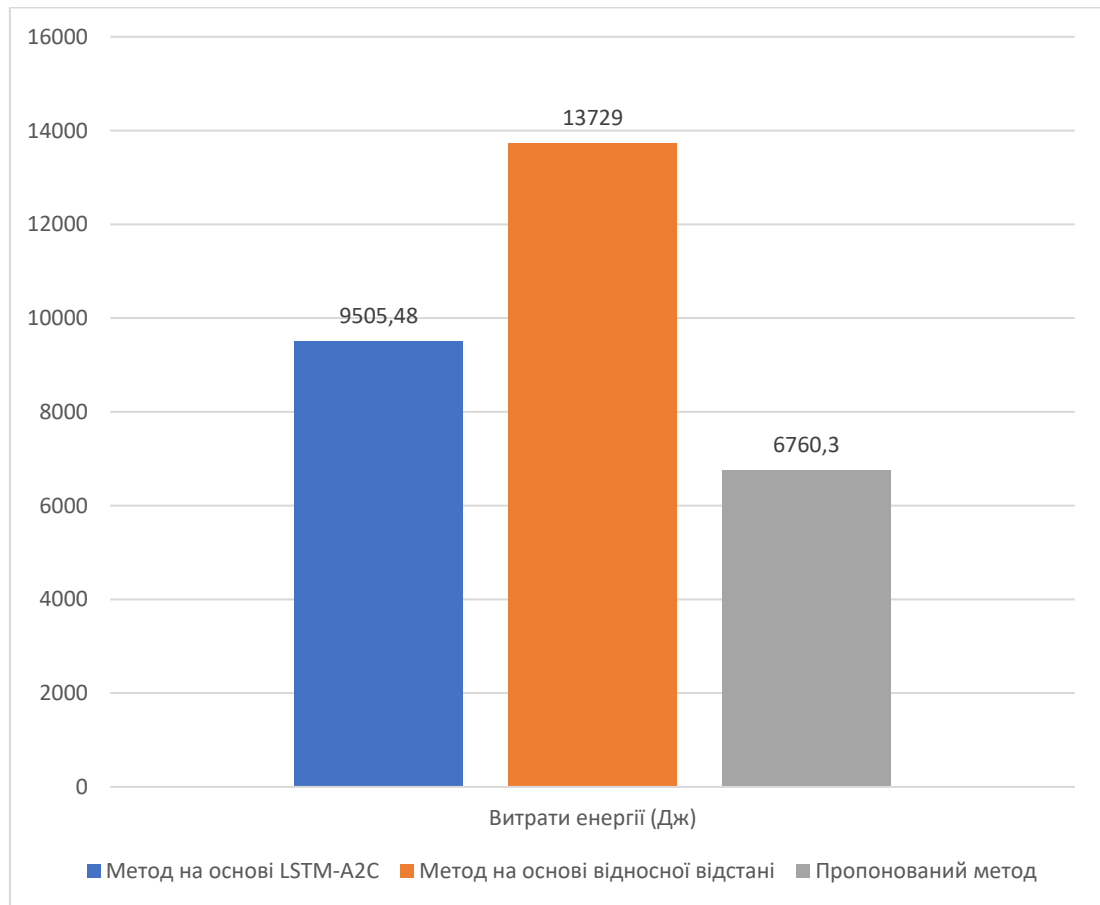


Рис. 3.8. Порівняння методів динамічного розташування БПЛА-БС з врахуванням параметрів каналу за середніми значеннями витрат енергії на зміну розташування вузла

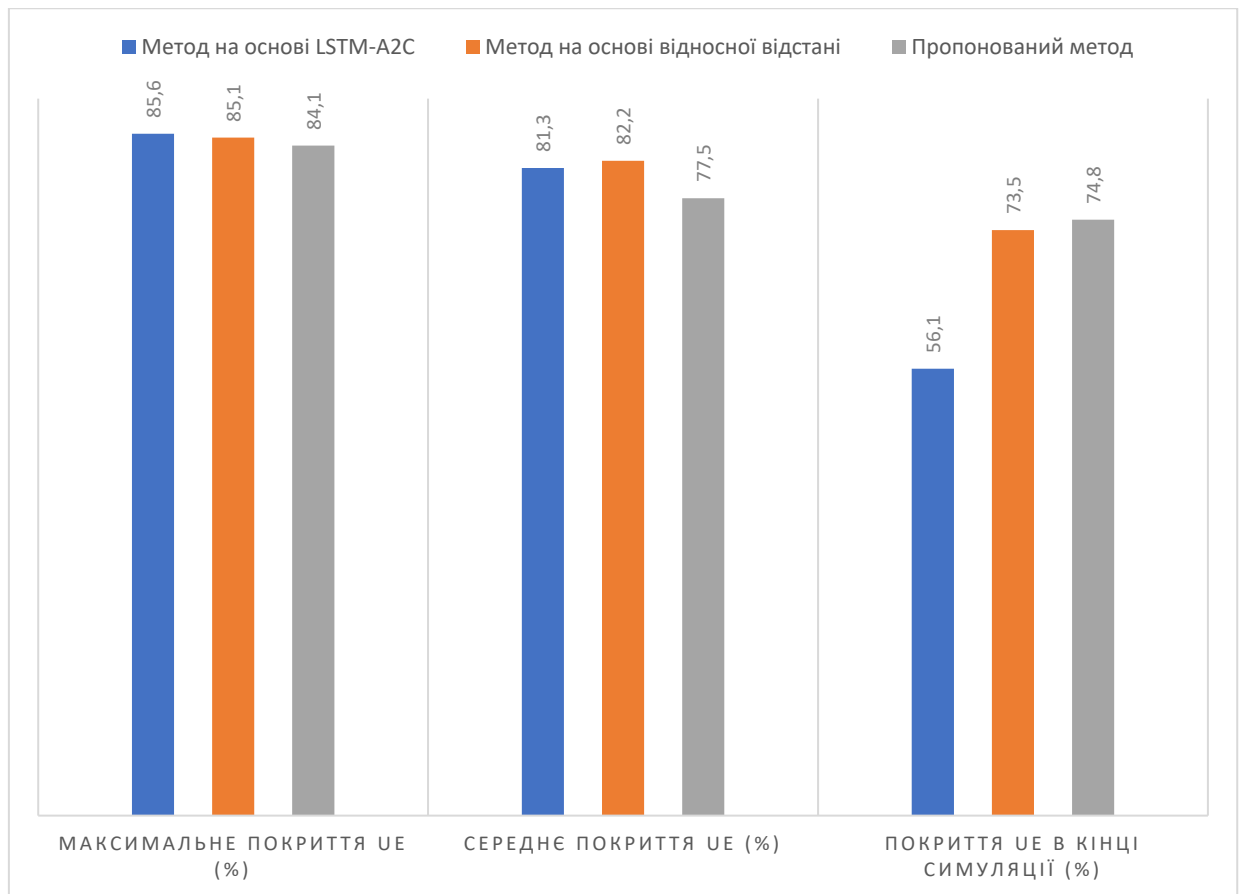


Рис. 3.9. Порівняння методів динамічного розташування БПЛА-БС з врахуванням параметрів каналу за середньою кількістю UE в зоні покриття на різних етапах симуляції

### Висновки до розділу 3

Представлено методи поліпшення показників якості на базі моделі розміщення і руху повітряних безпілотних платформ для обчислення відношення сигнал/шум для UE з врахуванням завмирань каналу та ймовірності хендоверу в сценарії нерухомого UE та рухомої БПЛА-БС. Визначено, що ймовірність хендоверу в UIM еквівалентна ймовірності хендоверу в наземній стільниковій мережі, де базові станції є стаціонарними, а користувацьке обладнання – мобільним, незважаючи на те, що в сценарії безпілотної стільникової мережі з мобільними БПЛА-БС і статичними абонентськими пристроями їхні ролі помінялися місцями.

Розглянуто модель енергоспоживання БПЛА з обертовим крилом, до яких належать квадрокоптери. Встановлено, що зліт споживає постійну потужність, але

горизонтальний політ може бути більш енергоефективним при оптимальних швидкостях. Встановлено, що компроміс між енергоспоживанням БПЛА та наземного терміналу полягає у збалансуванні цих двох джерел енергоспоживання з метою оптимізації загального енергоспоживання всієї системи або надання пріоритету одній зі сторін – економія енергії БПЛА досягається за рахунок регулювання потужності передачі від наземного користувача.

Розроблено метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-БС для обслуговування наземних користувачів, який на відміну від існуючих, дозволяє враховувати рух абонентів та забезпечує поліпшення енергоефективності вузлів телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності. Метод враховує параметри передбачуваного каналу: доплерівський зсув, втрати у вільному просторі, адитивний гаусівський шум, інтерференція та завмирання сигналу. Імітаційне моделювання показало ефективність методу в 77,5% покриття UE після розподілення користувачів між БПЛА-БС. В порівнянні з існуючими, пропонований метод зменшує якість покриття UE на 4%, дозволяючи в середньому зменшити енергоспоживання в 1,4 рази, що є прийнятним в практичних застосуваннях.



## **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

В багаторівневій АКМЗ-архітектурі, що розглядається в роботі, HAPS грають ключову роль в якості обчислювальних центрів для підтримки наземної-аерокосмічної мережі з інтеграцією БПЛА, що поєднують розширені радіо-функції з наявністю CPU/GPU та сховищем для локальної обробки даних, скорочуючи затримки та знижуючи обсяг бекхолу в порівнянні з виключно супутниковою реалізацією архітектури. З метою реалізації такої системи необхідно розробити модель інтеграції повітряних безпілотних платформ, що дозволить БПЛА виконувати функції базових станцій та взаємодіяти з HAPS для координації у просторі та розподілу ресурсів. Базовими передумовами моделі є простота в імплементації, висока швидкість розгортання в екстрених ситуаціях, можливість моніторингу та безшовного втручання оператора за необхідності і виконання вимог 3GPP до аерокосмічних мереж зв'язку щодо пропускної здатності та затримки з можливою похибкою до 15% при рівноцінному зменшенні енерговитрат. Модель повинна включати координацію БПЛА з врахуванням енергоефективності вузлів та параметрів каналу між БС та абонентами, такими як завмирання сигналу, доплерівський зсув та адитивний гаусівський шум і складатись з двох частин:

- 1) HAPS-сервіс, що відповідає за агрегацію і зберігання даних з БПЛА та координацію повітряних безпілотних платформ на основі аналізу абонентського трафіку;
- 2) DroneKit-клієнт на стороні БПЛА для взаємодії з сервісом HAPS.

### **4.1 Впровадження HAPS у якості повітряної обчислювальної платформи в умовах невизначеності**

У контексті АКМЗ HAPS можуть виконувати роль регенеративного вузла з бортовим обчисленням, забезпечувати кешування контенту, виконувати ML-інференс

над потоковим відео з дронів та координувати розподілені обчислювальні задачі між собою та землею. Це робить HAPS логічним центром хмарних обчислень, який здатен обробляти частину робочих навантажень без звернення до віддаленого дата-центру, забезпечуючи вищу доступність і детермінованість сервісів у віддалених або перевантажених районах. Такий підхід відповідає сучасним уявленням про АКМЗ як гібридної багаторівневої мережі, зокрема в умовах невизначеності, де HAPS доповнює наземну інфраструктуру і робить можливими нові сервіси із суворими вимогами до затримки та пропускну здатності.

У практичному застосуванні це означає, що HAPS виставляє набір керованих інтерфейсів: API для реєстрації та управління дронами, черги завдань для offload-обчислень, стріми телеметрії та канали команд-контролю. Дрони програмуються таким чином, щоб сприймати HAPS як свого «орієнтувального оператора»: вони надсилають періодичну телеметрію (позиція, батарея, метрики каналу), запитують конфігурації і завдання, отримують команди з аргументами (наприклад, `takeoff` → висота/курс/швидкість, `goto` → GPS-точка або відносний вектор, `loiter` → час/радіус, `land` → безпечна зона) і звітують про результати виконання. Ця взаємодія поєднує два класи каналів: контрольні команди з високою надійністю (CNPC) і `payload`-канали для передачі даних/відео; вибір радіо-діапазонів, механізмів пом'якшення Доплеру та повторів визначається вимогами до затримки, надійності й енергоспоживання.

Технічно реалізація «команд з аргументами» для дронів часто базується на легкій, але формальній моделі `RPC/command-message`: HAPS формує структуру з ідентифікатором команди, параметрами, часовими рамками та політикою відкату. Дрон отримує цю інформацію через захищений канал (рекомендовано `mTLS` або інший PKI-базований механізм), парсить та валідує параметри (наприклад, перевірка безпечності точки приземлення чи допустимого коридору польоту), виконує локальний планер руху і підтверджує `ACK/started/finished` стани назад у HAPS. Для реалізації на борту поширені набори як `DroneKit` (Python SDK), `MAVLink` або пропрієтарні SDK, які дають готові примітиви `takeoff/land/mission upload/mission item` і дозволяють впроваджувати логіку прийняття рішень, повторних спроб і безпечного зупинення при аномаліях [99]. Така архітектура розділяє відповідальність: HAPS

визначає що треба зробити та дає параметри, а дрон відповідає за безпечне і ефективне виконання завдань.

Важлива частина дизайну – оркестрація обчислень і маршрутизація ресурсів між HAPS і роєм дронів. Ідея полягає в тому, щоб HAPS виставляв задачі обчислення з метаданими про обсяг, необхідні ресурси та дедлайни. БПЛА, у свою чергу, повідомляють про свої можливості (capabilities) і поточний стан, через що HAPS приймає рішення, які завдання віддати на борт дрона, а які виконати в самому HAPS або переслати в наземний центр. Це дозволяє реалізувати гібридний offload/edge патерн: чутливі до затримки, але легкі завдання віддаються на борт, великі або агреговані завдання – HAPS/хмару, а критичні завдання можуть отримувати пріоритет і спрямовуватись до найближчого доступного вузла у АКМЗ-сітці.

З точки зору безпеки, надійності та операційності необхідно поєднати mTLS/OAuth для автентифікації, підписи і логування команд та результатів, локальне шифроване сховище сертифікатів на БПЛА та політику ротації ключів; водночас важливо впроваджувати ретельну валідацію параметрів команд (геозони безпеки, перевірки колізій) та механізми автоматичного відкату на випадок перевищення ліміту батареї або втрати зв'язку [101].

Скрипт на DroneKit виступає як «агент-виконавець» на бортовому комп'ютері БПЛА, поєднуючи дві сфери відповідальності: безпосереднє керування літальним апаратом через MAVLink та взаємодію з HAPS-оркестратором через захищений інтерфейс. При старті такий агент ініціалізує з'єднання з локальним автопілотом за допомогою DroneKit (connect), перевіряє готовність основних підсистем (статус GPS, рівень заряду, режим польоту) і одночасно встановлює асинхронний клієнт для HAPS-API. Це дає можливість одночасно слухати команди від HAPS, періодично шукати нові завдання, відправляти heartbeat і телеметрію, а також акумулювати локальні результати у випадку втрати каналу.

Коли HAPS створює команду з аргументами (наприклад, takeoff з цільовою висотою або goto з GPS-координатою), агент отримує її через опитування кінцевої точки, перевіряє допустимість параметрів (геозони безпеки, мінімальний запас батареї, обмеження висоти) і транслює її в набір Selenium-подібних (примітивних)

викликів DroneKit: `simple_takeoff`, `simple_goto` або формування Mission із елементами `MissionItem`. До початку виконання агент відправляє ACK у HAPS, присвоюючи команді локальний контекст виконання, запускає локальний watchdog і, в процесі, регулярно оновлює HAPS про стан виконання (`started` → `progress` → `finished`). Якщо під час виконання виникає нестандартна ситуація (відхилення траєкторії, падіння рівня батареї, втрата зв'язку з автопілотом), агент виконуватиме запасні сценарії: безпечний hover із спробою перепідключення, повернення до точки HOME, або негайну посадку в попередньо верифікованій зоні – і все це супроводжуватиметься повідомленнями про помилку та оновленнями статусу в HAPS.

Телеметрична частина агента збудована за принципом двошаровості: часті легкі повідомлення (heartbeat) надсилаються як короткі пакети з мінімальним набором полів, а деталізована телеметрія та payload (наприклад, кадри, логи, великі результати обробки) агрегуються локально та відправляються пакетно або заливаються в об'єктне сховище з передачею в HAPS лише метаданих і посилай. Локальна буферизація реалізована на основі полегшеної реляційної бази даних з простими таблицями для телеметрії й результатів, а механізм повторної відправки включає експоненційний бек-офф з джиттером: при відновленні зв'язку агент видаляє накопичені записи, коригує часові мітки за серверним часом і перевіряє ідемпотентність відповідно до політик HAPS (наприклад, унікальність по (`uav_id`, `ts`)). Така архітектура гарантує, що критичні повідомлення доходять навіть у поганих умовах АКМЗ, а великі файли не перевантажують CNPC-канал [100].

Безпека реалізована через mTLS або інший PKI-бекенд: на початку lifecycle агента виконується provisioning сертифікатів або приймається provisioning-токен від HAPS, після чого всі запити підписуються та встановлюються по TLS-каналу [102]. Додаткові захисні шари включають валідацію підпису команди та перевірку дозволів у конфігурації (які типи команд дозволено виконувати конкретному апарату). Для тестування й розробки агент має інтеграцію із SITL-симулятором, що дозволяє емулювати політ, відпрацьовувати сценарії відмов і перевіряти поведінку при втраті зв'язку.

Модуль агента організовується як набір маленьких, чітко визначених компонентів: модуль зв'язку з автопілотом (DroneKit wrapper), модуль HAPS-клієнта (клієнт із retry-логікою), модуль менеджера місій (перетворює HAPS-команди в DroneKit-примітиви), модуль буферизації та модуль безпеки. Такий поділ дозволяє легко тестувати кожен компонент окремо, підмінювати HAPS-клієнт моками під час unit-тестування і розширювати логіку виконання місій без зміни базової інтеграції. Таким чином, DroneKit-агент виступає природною реалізацією патерну «HAPS-оркестратор/БПЛА-виконавець», дозволяючи поєднати переваги локального автопілот-контролю і централізованого управління, що реалізоване в HAPS-сервісі.

## 4.2 Розробка функціонально-структурної моделі інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі

Система, що розглядається в роботі, складається з трьох логічних шарів. Аеронавігаційний шар (БПЛА) – дрони з бортовими сенсорами, телеметрією, обмеженим обчислювальним ресурсом, локальним буфером, API-клієнтом для зв'язку з HAPS. HAPS (стратосферна платформа/керуючий вузол) – центральний/авторитетний вузол для зберігання стейтів мережі, оркестрації обчислень, прийняття рішень. Має базу даних, API і черги/брокери. Наземний шар (БС/Наземні шлюзи/UE) – базові станції, шлюзи, користувачі, які постачають вимірювання та споживають послуги.

UAV (агент) в системі виконує наступні функції:

- Збирання телеметрії (GPS, батарея, сигнал), UE-спостереження (концентрації), локальні результати обробки.
- Локальний буфер та повторна відправка.
- Інтерфейси: REST клієнт до HAPS.
- Може виконувати периферійні обчислювальні завдання, завантажує результати в HAPS (через API).

Функціонал HAPS API (FastAPI), наведений в Додатку Е:

- REST ендпоінти для: реєстрації, heartbeat, telemetry (single/batch), jobs (pull/ack/result), config, faults, ue\_observations (Додаток Д).

- Використовує Async SQLAlchemy + GeoAlchemy2 для PostGIS.
- Валідуює та нормалізує дані через Pydantic.

База даних (Postgres + PostGIS):

- Таблиці: uav\_devices, uav\_telemetry, haps\_nodes, serving\_nodes, ue\_observations, compute\_jobs, fault\_reports, uav\_configs, network\_links, traffic\_stats (Додаток Г).
- Індеси GiST на географічні поля, унікальність (uav\_id, ts) для ідемпотентності.

Черги/брокери

- Kafka – для високошвидкісної телеметрії та асинхронної обробки (batching, analytics).

Структура моделі представлена на Рисунку 4.1.

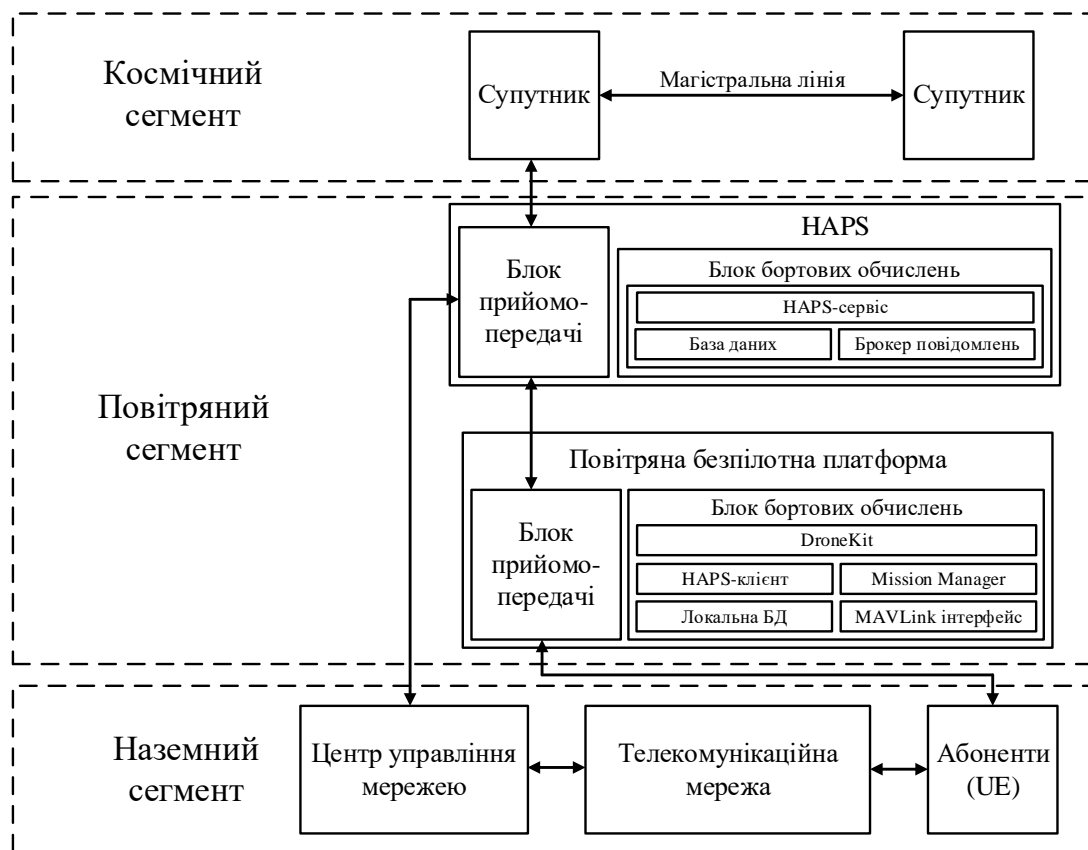


Рис. 4.1. Функціонально-структурна модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі

Кеш/Fast lookup – швидкі запити, rate limiting, locks реалізується через Redis.

Граничні обчислення/зберігання – великі результати обчислень (відео, знімки),

посилання з DB реалізується через S3/MinIO. Таким чином, весь рекомендований програмний апарат для реалізації моделі представлено в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Рекомендований програмний апарат для реалізації системи

Елемент	Програмне рішення
Мова	Python 3.11+
Веб-фреймворк	FastAPI (async)
ORM	SQLAlchemy 2.0 (async)+GeoAlchemy2
Драйвер DB	asyncpg
Міграції	Alembic
Геопросторові дані	PostGIS, Shapely
Брокер повідомлень	Kafka (черги)
Кешування	Redis
Зберігання об'єктів	MinIO/AWS S3
HTTP-клієнт	httpx
Контейнеризація	Docker
Оркестрація	Kubernetes
CI/CD	Forgejo/GitHub Actions/GitLab CI
Моніторинг	Prometheus+Grafana
Логування	ELK/Loki

Потоки даних можна поділити на чотири групи: реєстрація БПЛА, heartbeat, телеметрія та робота з задачами БПЛА.

*Реєстрація БПЛА.* Реєстрація безпілотного апарату у системі HAPS починається з безпечного HTTPS-запиту, у якому пристрій передає свій унікальний ідентифікатор, апаратно-програмні версії, перелік можливостей (наприклад, наявність камери чи підтримка edge-обчислень), а також за можливістю початкову геолокацію і часову мітку. На боці HAPS цей запит проходить валідацію, автентифікацію та атомарну обробку – відбувається upsert у таблицю uav\_devices (щоб забезпечити ідемпотентність і уникнути дублювань), одночасне створення або отримання конфігураційного профілю uav\_configs, логування сирого payload для аудиту і, за наявності координат, запуск просторового запиту до PostGIS для підбору найбільш підходящого HAPS (на основі відстані, статусу вузла і, за потреби, завантаження), після чого сервер повертає клієнту підтвердження реєстрації з

налаштуваннями (інтервал телеметрії, допустимі типи задач, розмір буфера) і, у разі provisioning, одноразовий токен або інструкцію для отримання mTLS-сертифікату.

Безпеку процесу посилюють TLS/mTLS для наступної взаємодії, контроль прав доступу (least-privilege), ротація сертифікатів та аудит подій, а механізми обробки помилок передбачають чіткі коди відповіді (400 – невірний формат, 401 – неавторизовано, 409 – конфлікт), логіку тайм-аутів і відновлення [103], а також політику зберігання клієнтського часу разом із серверною `received_at` для синхронізації. Комбінація надійної транзакційної роботи бази даних, геопросторових запитів і захищеного протоколу зв'язку відповідає рекомендаціям щодо архітектури АКМЗ і практикам управління стейтом у HAPS/БПЛА-середовищах.

*Heartbeat.* Передача сигналу життєдіяльності (heartbeat) у системі HAPS-БПЛА виконує критичну роль у підтриманні актуального стану мережі та управлінні ресурсами безпілотних апаратів. Кожен БПЛА із певною періодичністю, визначеною у своїй конфігурації, надсилає на сервер HAPS запит `POST /uav/heartbeat`, який містить унікальний ідентифікатор пристрою, часову мітку, рівень заряду батареї, поточний статус (наприклад, `idle`, `in_mission`, `error`), а також координати місцеположення, якщо вони доступні.

Отримавши запит, HAPS викликає внутрішню процедуру `update_uav_heartbeat()`, яка оновлює відповідний запис у таблиці `uav_devices`, зберігаючи нові значення полів `last_seen`, `battery_percent`, `status` і `location`, а також, за потреби, записує зміни у лог або таблицю подій для аналітики та моніторингу. Такий механізм дозволяє у реальному часі відстежувати активність та працездатність кожного БПЛА, виявляти відхилення у параметрах живлення або руху, оцінювати стан мережевого покриття й вчасно реагувати на можливі відмови. У разі втрати сигналу heartbeat HAPS може ініціювати процедури діагностики або передати команду на найближчі вузли для перевірки зв'язку.

У технічному сенсі обробка heartbeat є асинхронною транзакцією в базі даних PostgreSQL із підтримкою геопросторових полів (PostGIS), що забезпечує швидке оновлення навіть при великій кількості пристроїв [104]. Для безпеки дані heartbeat



передаються через захищений канал TLS або mTLS, а повтори запитів роблять операцію ідемпотентною, гарантуючи цілісність інформації.

*Телеметрія.* Це основний канал передачі оперативної інформації про позицію, стан бортових систем і якісні метрики каналу. Вона реалізується через два взаємопов'язані інтерфейси (POST /uav/telemetry для одиничних записів і POST /uav/telemetry/batch для масових завантажень) і обробляється на боці HAPS як транзакційно-ідемпотентний потік даних: кожен запис містить uav\_id, часову мітку (ts), геокоординати, висоту, батарею, статус, метрики сигналу та додаткові поля, і запис у таблицю uav\_telemetry виконується з гарантією відсутності дублів (унікальність по (uav\_id, ts)), при цьому одночасно оновлюється зведення в uav\_devices (остання позиція, last\_seen, батарея) для швидкого доступу до поточного стану.

Для надійності прийому передбачено буферизацію на боці БПЛА (локальна SQLite) та можливість пакетної вставки на сервері: пакетний шлях обробляє масиви телеметрії ефективним батч-інсертом, пропускає вже наявні записи і після успішного запису оновлює агреговані поля за останнім значенням для кожного апарату. Важливі моменти – збереження як серверної received\_at, так і клієнтської ts для кореляції та відлагодження, валідація допустимого часового зсуву, контроль синтаксису/розміру полів і очистка додаткових JSON-полів. У геопросторовому вимірі координати зберігаються як GEOGRAPHY(POINT,4326) (PostGIS) для швидких запитів і агрегувань (напр., щільність UE, пошук найближчих вузлів), а для надвеликого навантаження архітектура рекомендує використовувати стрімінг-брокер (Kafka) або COPY/bulk API драйвер для масових інжестів, кластеризація таблиць за часом і матеріалізовані уявлення для аналітики. Безпека: всі телеметричні канали мають працювати через захищений TLS/mTLS-канал з аутентифікацією пристроїв і rate-limiting, логи сирого payload зберігаються для аудиту, а політика зберігання даних і видалення – скоригована згідно регуляторних вимог. Така організація телеметрії забезпечує одночасно коректність та ідемпотентність даних, стійкість до розривів зв'язку і масштабованість для сценаріїв з тисячами БПЛА.

*Робота з задачами БПЛА.* Життєвий цикл обчислювальної задачі в HAPS-БПЛА системі починається з того, що контролер на HAPS створює запис у таблиці `compute_jobs` зі статусом `pending`, описом завдання в полі `payload` та метаданими (`created_at`, `due_by` тощо). Коли БПЛА готовий працювати, він робить запис `/uav/{id}/jobs` і отримує перелік доступних завдань (фільтрація може враховувати призначені завдання, `due_by` та типи, дозволені для цього апарату через `uav_configs`). Підтвердження початку виконання здійснюється через виклик `/uav/{id}/jobs/{job}/ack`, який на сервері виконує атомарну операцію (`pattern UPDATE ... RETURNING`) та реалізована функція `claim_job_for_uav()` встановлює `assigned_to = uav_id`, переводить статус у `running` та записує `started_at`, що робить процес `claim-інгу` резистентним до одночасних запитів на виконання одного обчислювального завдання від кількох апаратів.

Після виконання БПЛА надсилає результат на `/uav/{id}/jobs/{job}/result`, де сервер валідує відповідність, записує `result`, ставить `status = done` або `failed` і фіксує `finished_at` (для великих результатів рекомендується завантажувати `payload` у об'єктне сховище (S3/MinIO) і зберігати лише посилання в `result`). У цій схемі важливо підтримувати ідемпотентність і консистентність (перевіряти поточний статус робочого запису перед оновленням, ігнорувати повторні звіти або обробляти їх як оновлення), надавати чіткі коди помилок для клієнта та підтримувати механізми повторних спроб на боці БПЛА у разі мережевих збоїв.

Для продуктивних навантажень необхідно інструментувати чергу задач (метрики: `depth`, `latency`, `success/failure rate`), індексувати поля `status/due_by`, застосувати партиціонування для великої таблиці `jobs` і розглядати атомарні `bulk-операції` при масовому створенні завдань. Крім того, доступ до маршрутів `job-lifecycle` має бути суворо автентифікований (`mTLS/JWT`) та вноситись до журналу для аудиту. Така організація гарантує, що завдання в АКМЗ середовищі виконуються надійно, масштабовано та з урахуванням особливостей зв'язку і ресурсних обмежень БПЛА.

Послідовність прийняття рішень в системі від генерації запиту від UE до БПЛА та надання послуги за рішенням HAPS представлена на Рисунку 4.2.

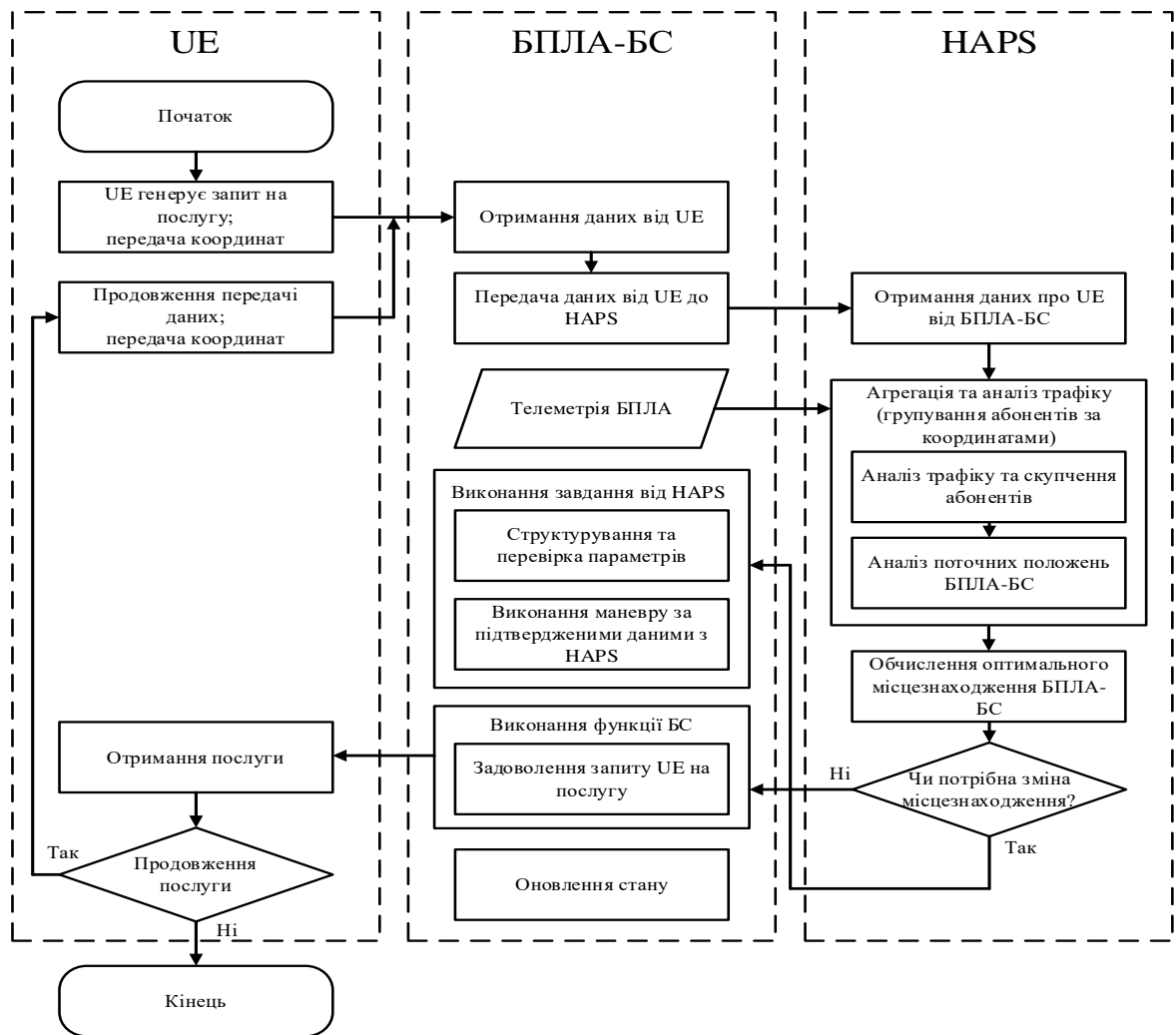


Рис. 4.2. Блок-схема алгоритму прийняття рішень аерокосмічної системи

Функції звернення БПЛА до HAPS представлені серією ендпоінтів, перший з яких це *POST /uav/register* і його допоміжна функція – точка входу, через яку безпілотний апарат офіційно приєднується до системи керування HAPS. Логіка роботи побудована так, щоб забезпечити безпечну реєстрацію, перевірку даних і створення або оновлення запису в базі даних у межах однієї атомарної транзакції [105]. Коли БПЛА уперше вмикається або потрапляє в зону покриття HAPS, його бортовий програмний модуль надсилає на сервер запит із JSON-повідомленням, яке містить ідентифікатор апарату (*uav\_id*), модель, версію апаратного та програмного забезпечення, список функціональних можливостей (наприклад, камери, типи обчислень, які він може виконувати), а також координати поточного розташування за їх наявності. Отримавши запит, ендпоінт створює асинхронну сесію SQLAlchemy та передає отримані дані до допоміжної функції, яка перевіряє, чи існує запис із таким

uav\_id у таблиці uav\_devices. Якщо запис уже є, відбувається його оновлення – змінюються поля моделі, версії, можливостей, час останнього з’єднання (last\_seen), а якщо апарат реєструється вперше – створюється новий запис із поточним часом у полі registered\_at.

Далі, якщо у запиті присутні координати, викликається геопросторова функція get\_nearest\_haps(session, lat, lon), що через PostGIS обчислює найближчий активний вузол HAPS і повертає його ідентифікатор – це дозволяє одразу призначити UAV до оптимального сервера. Після цього ендпоінт використовує хелпер get\_or\_create\_uav\_config(), який перевіряє, чи існує конфігурація для цього пристрою в таблиці uav\_configs; якщо ні – створює нову із типовими параметрами, такими як інтервал відправки телеметрії, максимальний розмір буфера та список дозволених типів обчислень. Усі ці зміни виконуються всередині однієї асинхронної транзакції, що гарантує консистентність навіть при великій кількості паралельних запитів.

Після успішного завершення операції функція комітить сесію та формує відповідь для БПЛА: у ній містяться підтвердження реєстрації, призначений вузол HAPS (якщо він знайдений), конфігураційні параметри та службове повідомлення. Таким чином, ендпоінт не лише додає пристрій до мережі, а й забезпечує йому перший «контракт» взаємодії – у вигляді конфігурації та прив’язки до HAPS. Така структура відповідає архітектурним принципам АКМЗ-систем: усі БПЛА реєструються централізовано, їхня інформація зберігається у єдиній базі PostGIS, а логіка взаємодії побудована на асинхронному, транзакційному та ідемпотентному підході, який гарантує точність і надійність реєстраційного процесу навіть у середовищі з великою кількістю одночасних пристроїв.

Ендпоінт *POST /uav/heartbeat* і його допоміжна функція відповідають за підтримання живого зв’язку між БПЛА і системою HAPS, дозволяючи контролеру мережі відстежувати стан, розташування та працездатність кожного пристрою в реальному часі. Коли БПЛА виконує періодичний виклик цього ендпоінту, він надсилає невеликий JSON-пакет із даними про себе – унікальний ідентифікатор (uav\_id), поточний рівень заряду батареї, статус польоту або завдання (status), часову мітку (ts) та, якщо доступно, координати свого розташування. Уся ця інформація є

мінімальною, але достатньою для того, щоб HAPS міг оцінити, чи пристрій активний, де він знаходиться, у якому стані його системи та наскільки стабільний зв'язок.

На стороні HAPS запит потрапляє у функцію `heartbeat()`, яка ініціалізує асинхронну сесію SQLAlchemy (`AsyncSession`) і передає дані в хелпер `update_uav_heartbeat(session, payload)`. Ця допоміжна функція реалізує головну логіку: вона шукає в базі запис UAV за його ідентифікатором, і якщо пристрій уже зареєстрований, оновлює ключові поля – `last_seen` (час останнього сигналу), `battery_percent`, `status` і `location`, якщо координати передано. Координати перетворюються у геопросторовий об'єкт типу `GEOGRAPHY(POINT,4326)` за допомогою `GeoAlchemy2` і `Shapely`, що дозволяє згодом будувати карти покриття, визначати зони активності або виконувати просторові запити для пошуку найближчих вузлів HAPS. Якщо БПЛА із таким ідентифікатором не знайдено, функція може повернути помилку або створити тимчасовий запис, позначаючи його як «невідомий», що дозволяє оператору виявляти неавторизовані пристрої.

Після внесення змін у таблицю `uav_devices` функція комітує транзакцію в базі даних і повертає у відповідь короткий JSON із підтвердженням успіху (`ok: true`), ідентифікатором БПЛА, часовою міткою й актуальним статусом. Для надійності весь процес побудований як асинхронний, а отже – здатен обробляти тисячі одночасних `heartbeat`-повідомлень від різних БПЛА без затримок і блокувань. З боку безпеки запит обов'язково проходить через авторизаційний механізм `require_api_key` або `mTLS`, а передані дані валідуються Pydantic-моделлю `UAVHeartbeatIn`, що запобігає помилкам формату або підробленим повідомленням.

Таким чином, цей ендпоінт є серцевиною моніторингової підсистеми HAPS: він перетворює систему на живу мережу, де кожен БПЛА регулярно «пульсує» у базу даних, повідомляючи про свій стан, і дає змогу аналітичним модулям HAPS у реальному часі будувати картину активності, енергоспоживання та стабільності зв'язку у несучільному середовищі АКМЗ.

*Ендпоінт POST /uav/telemetry* – це ключова ланка системи збору даних у HAPS, яка забезпечує постійний потік телеметричної інформації від БПЛА до центрального вузла. Коли БПЛА надсилає цей запит, він фактично передає зліпок свого поточного

стану – координати, висоту польоту, рівень заряду батареї, статус місії, швидкість, орієнтацію, температуру, а також часову мітку вимірювання. Повідомлення, сформоване за схемою UAVTelemetryCreate, містить мінімум полів, необхідних для оперативного моніторингу, але може також включати додаткові параметри, специфічні для конкретної моделі або місії (наприклад, навантаження на обчислювальний модуль чи якість сигналу з наземними UE).

Отримавши такий пакет, ендпоінт викликає асинхронну функцію `insert_uav_telemetry(session, payload)`, яка реалізує головну логіку: вона створює новий об'єкт UAVTelemetry і додає його до бази даних PostgreSQL із підтримкою PostGIS. У цьому процесі координати БПЛА перетворюються у геопросторовий формат `GEOGRAPHY(POINT,4326)` за допомогою бібліотек GeoAlchemy2 і Shapely, що дозволяє системі зберігати позиції у глобальних координатах і надалі виконувати просторові запити – наприклад, визначати траєкторії, обчислювати відстані до HAPS-вузлів або виявляти зони з високою концентрацією користувачів. Після вставлення телеметричного запису функція також оновлює таблицю `uav_devices`, синхронізуючи її поля `last_seen`, `battery_percent`, `status` і `location` із найсвіжішими даними, щоб HAPS мав миттєвий доступ до актуального стану кожного БПЛА без необхідності виконання складних агрегувальних запитів.

Для забезпечення надійності та відсутності дублів у таблиці `uav_telemetry` діє обмеження унікальності (`uav_id`, `timestamp`), що робить операцію ідемпотентною – повторне надсилання одного й того ж пакета не призведе до створення нового запису. У разі великої кількості повідомлень або тимчасових збоїв зв'язку БПЛА може зберігати телеметрію локально й надсилати накопичений пакет пізніше через ендпоінт `/uav/telemetry/batch`, який використовує аналогічну логіку, але оптимізований для вставки групи записів. Усі операції виконуються асинхронно в межах транзакції SQLAlchemy, що гарантує цілісність даних навіть при високому навантаженні.

З боку безпеки передача телеметрії відбувається через захищене TLS або mTLS-з'єднання, а валідація вхідних даних здійснюється через Pydantic-модель, що запобігає несанкціонованим або некоректним повідомленням. У результаті цей ендпоінт і його хелпер утворюють основу інформаційного контуру системи: вони

перетворюють потік сирих даних із UAV на структуровану базу, де кожен запис має геопросторову прив'язку, часову послідовність і контекстний зв'язок із місією чи станом апарата. Такий підхід відповідає вимогам АКМЗ-середовищ, де швидка, точна й безперервна телеметрія є критичною для координації ресурсів, підтримки QoS і прийняття рішень у реальному часі.

Ендпоінти *GET /uav/{uav\_id}/jobs та get\_available\_jobs\_for\_uav()* реалізують механізм видачі обчислювальних задач БПЛА. Запит, через який апарат запитує у HAPS актуальний набір завдань, які йому дозволено виконати. Коли запит надходить, сервер відкриває асинхронну сесію до бази і делегує підбір завдань хелперу: спочатку він відбирає кандидати з таблиці `compute_jobs` за простими критеріями – статус `pending`, або призначення `assigned_to` порожнє чи рівне цьому `uav_id`, і `due_by` не протермінований. Ці кандидати сортуються за часом створення, щоб віддавати перевагу старішим завданням. Далі хелпер підтягує конфігурацію БПЛА (якщо вона є) і застосовує політику фільтрування за типами задач: якщо в `uav_config.allowed_compute_types` перераховані допустимі типи, то із кандидатів відкидаються ті, чий `payload.type` явно не дозволений для цього апарату. Для зручності і безпеки вибірка може спочатку підвантажувати трохи більше записів, ніж потрібно, і вже у пам'яті відсівати непрохідні, щоб не робити занадто складні JSON-пошуки в SQL для кожного рядку.

У результаті функція повертає не більше `limit` завдань у форматі `ComputeJobRead`. На рівні API відповіді чітко дотримуються принципу розділення сигналу й дії: цей ендпоінт лише показує доступні завдання – фактичне «захоплення» завдання відбувається через окремий `ask`-ендоінт, який робить атомарний `UPDATE ... RETURNING`, що запобігає одночасним запитам на виконання між БПЛА. Технічно реалізація спирається на асинхронні SQL-запити `SQLAlchemy` і зручну роботу з полем `payload` як `JSONB`. Для підвищення продуктивності рекомендується виконувати частину фільтрації на рівні БД (через `JSONB`-оператори або `GIN`-індекси), кешувати часто використовувані конфігурації в `Redis`, та додавати метрики (глибина черги, `latency` вибірки) для оперативного моніторингу.

Ендпоінт *POST /uav/{uav\_id}/jobs/{job\_id}/ack* реалізує безпечний і атомарний механізм «захоплення» обчислювального завдання БПЛА та служить гарантією, що одне й те саме завдання не буде виконане кількома апаратами одночасно. Коли апарат надсилає ACK на цей маршрут, сервер відкриває асинхронну сесію та викликає хелпер, який виконує умовне оновлення в базі даних одним запитом – атомарний `UPDATE ... WHERE (id = job_id AND status = 'pending' AND (assigned_to IS NULL OR assigned_to = uav_id) AND (due_by IS NULL OR due_by >= now())) RETURNING ...` – у разі успіху запису `assigned_to` встановлюється в `uav_id`, статус змінюється на `running`, і поле `started_at` фіксує час початку виконання. Це повертає оновлений рядок без додаткових SELECT-запитів і тим самим усуває умови одночасних запитів на виконання, бо перша вдача операції отримує завдання (`job`), а інші одночасні спроби просто не зачіплять рядок і повернуть відсутність результату. Якщо хелпер повертає запис – ендпоінт відповідає підтвердженням із інформацією про `job_id`, `started_at` тощо. Якщо оновлення не відбулося, хелпер виконує діагностику причини (наприклад, `job` не знайдено → 404, `job` протермінований → 400, `job` вже має інший статус або призначений іншому БПЛА → 409) і ендпоінт повертає відповідний HTTP-код і пояснення клієнту.

Для того, щоб ACK був ідемпотентним, логіка також допускає повторні ACK від того самого `uav_id` – якщо `job` вже призначено цьому БПЛА і має статус `running`, повторний ACK поверне успіх без повторної модифікації. Якщо ж інший БПЛА уже взяв `job`, то повторний ACK поверне конфлікт. Технічно реалізація спирається на індексування полів `status`, `assigned_to`, `due_by` для швидких умовних оновлень, збереження `started_at` для моніторингу і SLA-метрик та логування операцій для аудиту. Додатково бажано мати механізм `watchdog/timeout`, що переведе `running`-завдання назад у `pending` або у стан `failed` якщо `finished_at` не буде встановлено в очікуваний проміжок, а також чергу повідомлень/метрики для спостереження (черга глибина, час від `claim` до завершення).

У сценаріях з високою конкуренцією можна розглянути варіанти оптимізації: атомарні SQL-операції (як зараз) – найпростіший і найефективніший спосіб. Альтернативно можливе використання `advisory locks`, `Redis-based locks` або окремої



служби claim, якщо потрібна розподілена координація між кількома БД/кластерами. У будь-якому випадку важливо уникати довгих транзакцій (не тримати важку роботу всередині транзакції), відправляти великі результати в об'єктне сховище (S3/MinIO) і забезпечувати сувору автентифікацію/авторизацію (mTLS/JWT) для всіх викликів life-cycle ендпоінтів [105].

В Додатку Є наведено реалізацію асинхронного агента-представника безпілотного апарата, який інкапсулює всю клієнтську логіку взаємодії з HAPS API: від початкової реєстрації і отримання конфігурації до періодичних heartbeat-повідомлень, відправлення одиничної та пакетної телеметрії, отримання і підтвердження завдань та звітування про їхні результати. Код побудовано навколо `httpx.AsyncClient` для неблокуючих HTTP-запитів і локальної SQLite-бази як надійного буфера – якщо мережа недоступна, телеметрія та результати роботи поміщаються у таблиці буфера. При відновленні зв'язку клієнт викликає методи `flush_telemetry_buffer` та `flush_result_buffer`, які пакетом надсилають накопичені записи і видаляють успішно доставлені елементи.

Кожен метод – `register`, `get_config`, `heartbeat`, `send_telemetry`, `get_jobs`, `ack_job`, `post_job_result`, `post_ue_observation`, `report_fault` та `poll_commands` чітко відокремлений, повертає структурований JSON-результат та обробляє помилки мережі, повертаючи зрозумілі статуси або буферизуючи дані. При цьому часові мітки ставляться у форматі UTC, а телеметрія автоматично доповнюється `uav_id`, якщо його не вказано. Архітектурно клієнт сприяє ідемпотентності (повторні надсилення не створюють некоректних станів на сервері завдяки серверним перевіркам), підтримує просту стратегію повторних спроб і буферизації без блокувань, і легко інтегрується в планувальник або `service loop` для періодичних завдань.

З точки зору безпеки, передачу ключа необхідно виконувати через mTLS або OAuth2/JWT. Для підвищення стійкості необхідно додати експоненційний бекоф із джитером, лімітувати частоту повторів, підключити шифроване сховище для сертифікатів/ключів на борту та логувати метрики (успішні/неуспішні запити, розмір буфера, час затримки) для спостереження. Таким чином, модель представляє гнучкий, тестований і практичний шаблон клієнта, який перетворює невизначені мережеві

умови АКМЗ у надійну модель доставки даних і взаємодії з HAPS, дозволяючи плавно масштабуватися від симуляторів до реальних апаратних платформ.

#### 4.3 Симуляційне моделювання методу підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ

Архітектура була перевірена симуляційною моделлю з розташуванням HAPS на висоті 15 км та БПЛА-БС на висоті 120 м. UE були випадково розподілені навколо БПЛА-БС у радіусі 250 м. Передбачається, що канал телеметрії використовує вузькосмуговий L-діапазон для обміну даними між БПЛА та HAPS. Випробування показали наступні результати:

- Середня затримка каналу телеметрії: 74,391 мс;
- Середня пропускна здатність каналу телеметрії 296 кбіт/с;
- Середня наскрізна затримка висхідного каналу UE-БПЛА-HAPS: 1,33 мс;
- Середня наскрізна корисна пропускна здатність висхідного каналу UE-БПЛА-HAPS: 98,378 Мбіт/с;
- Середня наскрізна затримка низхідного каналу UE-БПЛА-HAPS: 4,259 мс;
- Середня наскрізна корисна пропускна здатність низхідного каналу UE-БПЛА-HAPS: 86,959 Мбіт/с;

Результати моделювання наведені на Рисунках 4.3-4.4.

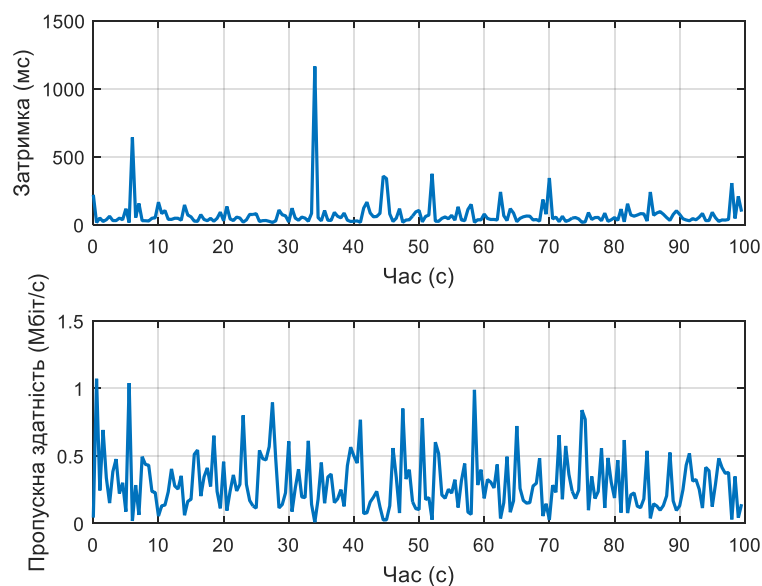


Рис. 4.3. Результати моделювання каналу телеметрії БПЛА-HAPS

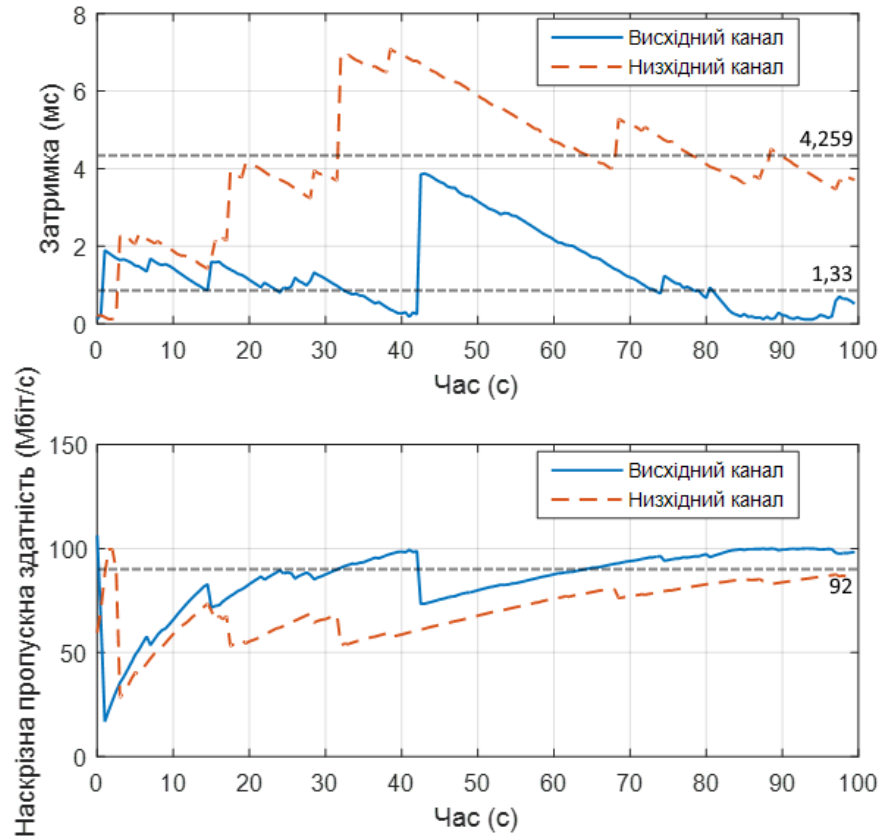


Рис. 4.4. Результати моделювання каналу UE-БПЛА-HAPS

Як бачимо з Рисунку 4.4, канал між абонентами в мережі із застосуванням повітряних безпілотних платформ та HAPS має середню наскрізну затримку в 1,33 мс для висхідного і в 4,259 мс для низхідного каналу зв'язку. Таким чином ми отримуємо вигравш в середньому в 15 мс в порівнянні з суто супутниковим сценарієм розгортання екстреної мережі зв'язку зі збереженням середньої наскрізної пропускної здатності в 92 Мбіт/с [106].

Каналу з пропускною здатністю 296 кбіт/с достатньо для періодичної передачі телеметрії та отримання команд з HAPS, що забезпечуватимуть роботу алгоритму пошуку місцезнаходження та зміни розташування вузлів мережі. Параметри пропускної здатності та затримки каналу між користувачами, отримані в результаті моделювання, також відповідають вимогам, встановленим 3GPP до аерокосмічних систем зв'язку про мінімальну швидкість передачі низхідного і висхідного каналу зв'язку, що становлять 50 Мбіт/с і 25 Мбіт/с відповідно, та вимог до затримки, що становить від 3 до 15 мс, з наскрізною затримкою 30 мс [107].

Система взаємодії БПЛА та HAPS була розгорнута на базі високопродуктивного асинхронного API-сервісу, призначеного для взаємодії з декількома розподіленими клієнтами. Симуляція передбачала 10 незалежних клієнтів-БПЛА, які постійно взаємодіють із серверною частиною через паралельні потоки запитів. Результати моделювання сервісу показані на Рисунках 4.5-4.7.

```
{url}/uav/register
200
{"access_token":"eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJzdWIiOiJhbmFseXN0IiwiaXhwIjozNzc3MjA0MDYzZfQ.QUhPtXdsJz0bb02hRYi5KU78v_w8Lv00K-wwYQNIIs","refresh_token":"eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJzdWIiOiJhbmFseXN0IiwiaXhwIjozNzc3MjA0MDYzZfQ.QUhPtXdsJz0bb02hRYi5KU78v_w8Lv00K-wwYQNIIs","token_type":"bearer"}
{url}/uav/heartbeat
200
0:00:00.015782
{url}/uav/12/config
200
0:00:00.019333
{url}/uav/12/jobs
200
0:00:00.020305
{url}/uav/12/jobs/213/ack
200
0:00:00.018237
{url}/uav/heartbeat
200
0:00:00.027881
{url}/uav/telemetry
200
0:00:00.024820
{url}/uav/heartbeat
200
0:00:00.028211
{url}/uav/telemetry
```

Рис. 4.5. Ініціалізація та виконання базової логіки агента на стороні DroneKit

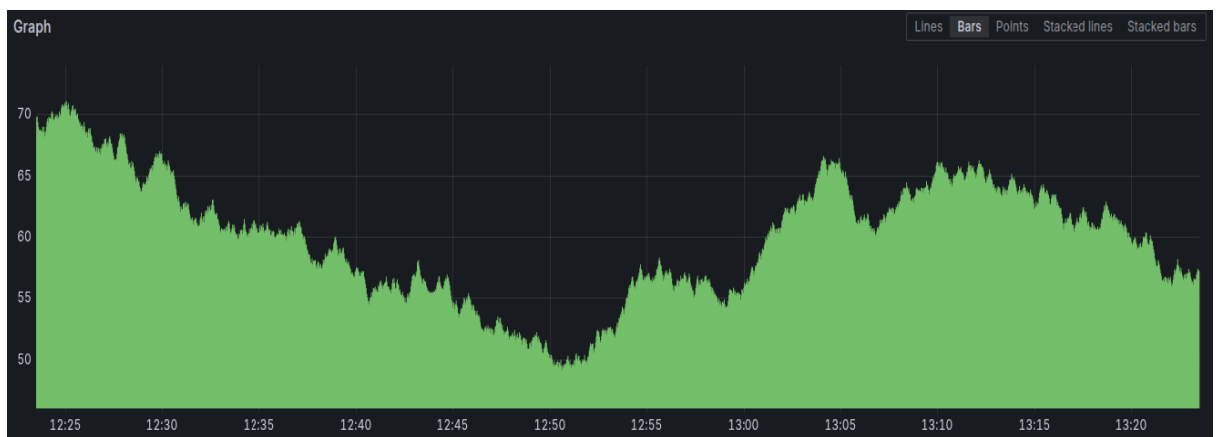


Рис. 4.6. Обробка запитів до HAPS API

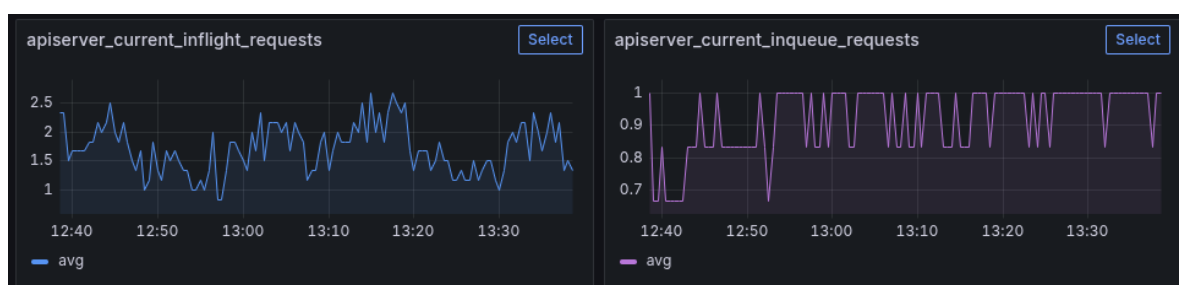


Рис. 4.7. Метрики запитів до системи, що знаходяться в обробці

Сервіс продемонстрував обробку відповідей з низькою затримкою, з середньою швидкістю обробки запитів в 15-30 мс. Така швидкість реагування зберігається навіть за умов коливань навантаження. Система працює з обсягом запитів від 50 до 70 запитів за спостережувані інтервали, при середній пропускній здатності приблизно 62 запитів.

Паралельність обробляється ефективно, що відображається в показниках часу виконання. Середня кількість запитів, що знаходяться в обробці, залишається низькою – близько 1,64, що вказує на те, що запити обробляються швидко, не накопичуючи значного відставання. Аналогічно, середня кількість запитів у черзі залишається мінімальною, на рівні 0,9, що свідчить про те, що система рідко стикається з вузькими місцями або затримками у прийманні запитів.

Результати моделювання демонструють високу оптимізацію архітектури для взаємодії в режимі реального часу, підтримуючи стабільну продуктивність при різних рівнях навантаження, забезпечуючи при цьому мінімальну затримку та стабільний потік запитів.

#### **Висновки до розділу 4**

В розділі розроблено функціонально-структурну модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі, яка базується на теорії прийняття рішень та дозволяє підвищити точність розташування вузлів аерокосмічної мережі з урахуванням параметрів каналу, що мінімізує витрати енергії при зміні місцезнаходження повітряних безпілотних платформ. Модель передбачає використання HAPS як платформи оркестрації обчислень та маршрутизації ресурсів між HAPS і БПЛА-БС. Розроблено метод «агента-виконавця» БПЛА через DroneKit, який дозволяє безпосереднє керування літальним апаратом через MAVLink та взаємодію з HAPS-оркестратором через захищений інтерфейс. Така реалізація дає можливість БПЛА-БС отримувати структуровані команди від HAPS і виконувати їх без втрати швидкодії через необхідність додаткових обчислень.

На основі дослідження архітектури взаємодії HAPS, БПЛА та UE виявлено головні аспекти обміну даними для реалізації у вигляді програмного рішення імітаційної моделі інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі з HAPS в ролі центрів граничних обчислень даних з БПЛА та наземних користувачів. Забезпечення надійності функціонування мережі з використанням БПЛА передбачає поєднання використання підтверджених даних з HAPS та інерціально-навігаційної системи БПЛА для протидії підробці та глушінню сигналів GPS.

Розроблено імітаційну модель взаємодії між UE, БПЛА-БС та HAPS, що за результатами моделювання показує середню затримку 74,391 мс і пропускну здатність 296 кбіт/с каналу телеметрії у вузькосмуговому L-діапазоні, середню наскрізну затримку каналу UE-БПЛА-HAPS в 1,33 мс для висхідного і 4,259 мс для низхідного каналу зв'язку, що відповідає вимогам до аерокосмічних систем зв'язку, встановлених 3GPP. Практична перевірка архітектури (локальний PoC) показала ефективну роботу ендпоінтів, хелперів та DroneKit-клієнту, гарантують надійність передачі даних, коректну обробку одночасних запитів з середньою швидкістю обробки в 15-30 мс і базову стійкість до розривів зв'язку.

## ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційного дослідження вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності, яке має суттєве значення для галузі знань «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка. Відсутність аналогічних рішень в Україні робить результати досліджень пріоритетними.

У дисертації одержані такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану та проблематики функціонування телекомунікаційних систем з інтеграцією повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності доведено, що ключові показники ефективності аерокосмічних мереж значною мірою залежать від стохастичного характеру каналів зв'язку, обмежень енергоресурсів платформ та динаміки просторового положення користувачів і БПЛА. Зазначені обставини підтверджують актуальність поставленого наукового завдання.

2. *Удосконалено* математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем в умовах невизначеності на базі теорії завадозахищеності, яка відрізняється від існуючих тим, що окрім адитивного гаусівського шуму враховує зміну коефіцієнту передачі варіантів багатопозиційного сигналу з амплітудно-фазорізницевою модуляцією внаслідок завмирань сигналу, що забезпечує заданий рівень достовірності передавання інформації в умовах завад.

3. *Удосконалено* метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-базової станції для обслуговування наземних користувачів, який на відміну від існуючих, базується на удосконаленій математичній моделі каналу обміну між базовою станцією та користувачем і, за рахунок визначення ступенів важливості абонентів на основі їх параметрів руху відносно БПЛА-БС та параметрів каналу між БПЛА-БС і абонентами, дозволяє оптимізувати точність розташування та витрати енергії вузлів телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності.

4. *Вперше розроблено* функціонально-структурну модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі, яка базується на методі визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-базової станції для обслуговування наземних користувачів з урахуванням параметрів каналу зв'язку та мінімізації енергетичних витрат на маневрування повітряних безпілотних платформ, що дозволяє приймати рішення щодо ефективного розташування вузлів мережі з оптимальною точністю в умовах невизначеності.

5. Розроблений метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності дозволяє використання операторами мобільних мереж для оптимізації завантаженості каналів та забезпечення безперервності зв'язку в умовах високої мобільності абонентів. Математичні моделі каналу для обміну інформацією між базовою станцією і користувачем з врахуванням завмирання сигналу та підвищення енергоефективності, а також представлена в роботі функціонально-структурна модель інтеграції БПЛА в аерокосмічній мережі можуть бути використані при створенні стандартів аерокосмічних систем зв'язку із застосуванням повітряних безпілотних платформ та дозволяють прогнозувати продуктивність мереж у різних сценаріях та мінімізувати витрати на їхнє розгортання.

Розроблена функціонально-структурна модель на базі методу динамічного розташування БПЛА-базової станції з врахуванням параметрів каналу дозволяє при зменшенні якості покриття на 4% покращити середні показники енергоспоживання повітряних безпілотних платформ в 1,4 рази, в порівнянні з існуючими методами на основі LSTM-A2C та методом на основі відносної відстані, що є прийнятним в практичних застосуваннях.

Розроблена функціонально-структурна модель взаємодії між UE, БПЛА-БС та NAPS дозволила оцінити показники пропускної здатності та наскрізної затримки в інтегрованій аерокосмічній телекомунікаційній мережі. За результатами моделювання середня затримка каналу телеметрії у вузькосмуговому L-діапазоні становить 74,391 мс при пропускній здатності 296 кбіт/с. Для архітектури UE-БПЛА-NAPS у межах запропонованої моделі отримано середню наскрізну затримку 1,33 мс для висхідного



та 4,259 мс для низхідного каналу зв'язку, що відповідає вимогам до аерокосмічних систем зв'язку, встановлених 3GPP.

Розроблений в роботі сервіс на основі функціонально-структурної моделі інтеграції БПЛА пройшов практичну перевірку архітектури (локальний PoC), що підтвердила працездатність запропонованого підходу, ефективну взаємодію ендпоінтів сервісу та DroneKit-клієнту, коректну обробку одночасних запитів, базову стійкість до розривів зв'язку та середній час обробки запитів у межах 15-30 мс та середньою кількістю запитів в черзі, що становить 0,9 запитів в секунду.

6. Достовірність результатів підтверджується результатами імітаційного моделювання та практичною перевіркою локального PoC.

7. Мета досліджень щодо підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ на основі поліпшення показників ефективності в умовах невизначеності і всі поставлені окремі завдання виконані повністю. Отримані наукові результати досліджень є внеском у розвиток сучасних методів, моделей та технологій в галузі інформаційних технологій, автоматизації та телекомунікацій.

8. Перспективними напрямками подальших досліджень є напрями використання методів машинного навчання та нейронних мереж для динамічної маршрутизації з врахуванням підвищеного ризику відмов безпілотних повітряних платформ в аерокосмічних мережах зв'язку, оптимізації методів безперервного енергозабезпечення повітряних безпілотних платформ на основі ротаційної заміни мобільних вузлів та безперебійного хендоверу, а також перспективи інтеграції аерокосмічних мереж зв'язку з використанням БПЛА до стільникових мереж шостого покоління з врахуванням енергоефективності зв'язку.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Яковець В.П., Макаренко А.О., Гринкевич Г.О., Хаб'юк Н.С. Перспективи використання БПЛА-ретрансляторів в інтегрованих TN та NTN-мережах. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. №1 (74). С. 36-46. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.013646>.
2. Яковець В.П., Макаренко А.О., Руденко Н.В., Скрипнік В.В. Застосування машинного навчання під час інтеграції супутникового та БПЛА зв'язку. Зв'язок. 2023. №1 (161). С. 3-9. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.010309>.
3. Яковець В.П., Горохов О.С., Колесніков О.Е., Руденко С.В., Гарячий А.Л., Швець Д.М. Проблеми імплементації інтегрованої супутниково-наземної NTN-мережі. // Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2024. №1 (5). С. 112-119. URL: <https://doi.org/10.31673/2518-7678.2024.011414>.
4. Макаренко А.О., Яковець В.П., Горохов О.С. Бюджет каналу інтегрованої системи стільниково-супутникового зв'язку. // Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2024. №2 (6). С. 14-20. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.024589>.
5. Горохов О.С., Яковець В.П., Макаренко А.О. Позиціонування абонентського обладнання в мережах 5G з використанням випередження часу. // Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2025. №1 (7). С. 26-32. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2025.016173>.
6. Яковець В.П., Колесніков О.Е., Руденко С.В., Швець Д.М. Метод маршрутизації на основі машинного навчання в телекомунікаційних системах з використанням БПЛА. // Зв'язок. 2025. №4 (176). С. 19-25. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2025.049695>.
7. Яковець В.П., Руденко С.В., Колесніков О.Е., Швець Д.М. Конфіденційна передача даних в телекомунікаційних системах з інтеграцією БПЛА. // Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2025. №2 (8). С. 89-97. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2025.025427>.

8. Yana Kremenetskaya; Anatoliy Makarenko; Natalia Rudenko; Vsevolod Yakovets; Andriy Lemeshko; Nazarii Blazhennyi. Spatial Modulation of Signals Using Polarization Methods for Wireless Communication Systems in the Optical and Radio Bands. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 10-14 October 2022. Kyiv, Ukraine.
9. PAUL J., MAHENDIRAN N. A Study on 5G Technology and Its Application. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. 2026. Vol. 10, no. 03. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.55041/ijssrem57517>.
10. Anooz R. S. A., Pourrostam J., Al-Ibadi M. An overview of beam-tracking techniques for mmWave wireless communications. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2025. URL: <https://doi.org/10.1631/fitee.2500138>.
11. Quality of Service in 4g and 5g Network: A Comparative Study of Urban and Rural Performance / A. O. Vero et al. Engineering and Technology Journal. 2026. Vol. 11, no. 03. URL: <https://doi.org/10.47191/etj/v11i03.19>.
12. Chee Keong C. S., Sh Ahmad F. Revisiting IoT Business Model Frameworks in the 5G Era: An Ecosystem Dynamics Perspective. Journal of Entrepreneurship and Business Innovation. 2025. Vol. 12, no. 1. P. 122. URL: <https://doi.org/10.5296/jebi.v12i1.23079>.
13. Overview of 5G security technology / X. Ji et al. Science China Information Sciences. 2018. Vol. 61, no. 8. URL: <https://doi.org/10.1007/s11432-017-9426-4>.
14. A Systematic Study to Determine 5G Baseline Performance for Scientific Computing / V. Kumar et al. SoutheastCon 2023, Orlando, FL, USA, 1–16 April 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/southeastcon51012.2023.10115108>.
15. Sayed A. Evolution and Challenges in 5G Telecommunications: A Technical Overview of Network Architecture and Performance Optimization. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT. 2024. Vol. 08, no. 12. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.55041/ijssrem11011>.
16. Frauendorf J. L., Souza É. A. d. Architectural and Technological Revolution Of 5G. Springer International Publishing AG, 2022.
17. Dilli R. Analysis of 5G Wireless Systems in FR1 and FR2 Frequency Bands. 2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications

(ICIMIA), Bangalore, India, 5–7 March 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icimia48430.2020.9074973>.

18. Design of an Intelligent Trust Management Architecture for 5G Service Deployment / S. Bouakkaz et al. 11th International Conference on Information Systems Security and Privacy, Porto, Portugal, 20–22 February 2025. 2025. P. 310–317. URL: <https://doi.org/10.5220/0013252200003899>.

19. Ilchenko M., Uryvsky L., Osypchuk S. The Main Directions of Improving Information and Communication Technologies in the Global Trends. Advances in Information and Communication Technology and Systems. Cham, 2020. P. 3–22. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0_1).

20. Transforming 5G Mega-Constellation Communications: A Self-Organized Network Architecture Perspective / M. Corici et al. IEEE Access. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3530930>.

21. Farajzadeh A., Yadav A., Yanikomeroglu H. Federated Learning in NTN: Design, Architecture, and Challenges. IEEE Communications Magazine. 2025. Vol. 63, no. 6. P. 26–33. URL: <https://doi.org/10.1109/mcom.001.2400484>.

22. Enhanced Sensing in 6G NTN: Imaging with LEO Satellite and UAV Communication Network / X. Lv et al. IEEE Sensors Journal. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2025.3564152>.

23. Embedded communication system design, implementation of the MB-OFDM transceiver and its optimization for short-range IoT in 5G/6G applications / S. N. Dessai et al. Network Security and Data Privacy in 6G Communication. New York, 2025. P. 40–84. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003583127-3>.

24. 3GPP Release-18 Physical Layer Enhancements for IoT-NTN / G. A. Medina-Acosta et al. IEEE Communications Standards Magazine. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 18–24. URL: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.0001.240>.

25. The role of 6G NTN in emergency and crisis management / C. Amatetti et al. 2024 IEEE Future Networks World Forum (FNWF), Dubai, United Arab Emirates, 15–17 October 2024. 2024. P. 75–81. URL: <https://doi.org/10.1109/fnwf63303.2024.11028806>.

26. Jang J., Park S., Choi S. An Overview of Non-Terrestrial Network Technologies in 3GPP Release 19. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences. 2024. Vol. 49, no. 8. P. 1064–1073. URL: <https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.8.1064>.
27. An SCMA Receiver for 6G NTN based on Multi-Task Learning / B. De Filippo et al. 2024 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Cape Town, South Africa, 8–12 December 2024. 2024. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/gcwkshp64532.2024.11101575>.
28. Tong X., Xie Z., Gu Y. A Review of Non-Terrestrial Network Standard Development in 3GPP RAN and Future Directions for 6G. AIAA SCITECH 2025 Forum, Orlando, FL. Reston, Virginia, 2025. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2025-2717>.
29. Integrated 6G TN and NTN Localization: Challenges, Opportunities, and Advancements / S. Saleh et al. IEEE Communications Standards Magazine. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.2025.3569014>.
30. O-RAN Based NTN Architecture: Open NTN Concept and Optimization of Power Allocation and Fronthaul Compression / J. Lee et al. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2025. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1109/taes.2025.3541611>.
31. IoT NTN for Voice Services: Architectures, Protocols, and Challenges / X. Huang et al. IEEE Network. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.2024.3379517>.
32. Alsaeedy A. A. R., Mohsen M. K., Chong E. K. P. 5G/6G TN-NTN Coexistence: Perspectives on Seamless Service and Handover Management. IEEE Network. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.2025.3569154>.
33. 5G Non-Terrestrial Networks / A. Vanelli-Coralli et al. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2023.
34. An overview of the IRIDIUM (R) low Earth orbit (LEO) satellite system / C. E. Fossa et al. IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference NAECON 1998. Celebrating 50 Years, Dayton, OH, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/naecon.1998.710110>.

35. Optimizing Cost-Efficient SFC Routing in NTN: A Novel Transformer-Ant Colony Optimization Framework / Y. Li et al. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2025. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1109/tvt.2024.3524583>.
36. Tsai W.-C., Huang N.-T. Implementation of multi-UAV communication relay function based on mobile telecommunication technology. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2025. Vol. 2025, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-025-02447-y>.
37. Overview of development and regulatory aspects of high altitude platform system / D. Zhou et al. *Intelligent and Converged Networks*. 2020. Vol. 1, no. 1. P. 58–78. URL: <https://doi.org/10.23919/icn.2020.0004>.
38. Megnafi H., Yassine Medjati W. Quadrotor-Type UAVs Assembly and Its Application to Audit Telecommunications Relays. *Aeronautics - New Advances*. 2022. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.104254>.
39. Pliushch O., Zhurakovskiy B., Klymash M. Robust Control Channel of Unmanned Aerial Vehicle. 2023 IEEE 5th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 21–25 November 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/aict61584.2023.10452677>.
40. Next-Gen UAV-Satellite Communications: AI Innovations and Future Prospects / S. Hashima et al. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. 2025. P. 1–35. URL: <https://doi.org/10.1109/ojvt.2025.3587028>.
41. Review of UAVs for efficient agrochemical spray application / N. Raosaheb atkal et al. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251801.8979>.
42. Wi-Fi based Telecommunication Infrastructure Delivered as a Service by UAV for Emergency Response / A. Zolich et al. 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dubrovnik, Croatia, 21–24 June 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/icuas54217.2022.9836050>.
43. Enhancing UAV Path Planning Efficiency Through Accelerated Learning / J. Viana et al. 2024 IEEE 29th International Workshop on Computer Aided Modeling and

Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Athens, Greece, 21–23 October 2024. 2024. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/camad62243.2024.10942806>.

44. Bakirci M., Ozer M. M. Surveillance, Reconnaissance and Detection Services for Disaster Operations of IoT-Based eVTOL UAVs with Swarm Intelligence. 2023 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS), Chattanooga, TN, USA, 11–12 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/isdfs58141.2023.10131702>.

45. Salii O., Hol V. Method of determining the maximum flight range of a UAV using the FPV mode and using the centimeter frequency range of radio-link in laboratory conditions. Collection "Information Technology and Security". 2024. Vol. 12, no. 2. P. 297–312. URL: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2024.12.2.315765>.

46. Samoilenko V. Drone regulations in Ukraine. L2b Aviation. Ukraine - 2019. URL: [https://www.asterslaw.com/press\\_center/publications/drone\\_regulations\\_in\\_ukraine/](https://www.asterslaw.com/press_center/publications/drone_regulations_in_ukraine/).

47. Yurii M. The Process of Network Flows Distribution based on Traffic Engineering Method. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2019. Vol. 8, no. 6. P. 3036–3042. URL: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/60862019>.

48. Tawada M., Ohta Y., Nagate A. Design of Robust LoS-MIMO Transmission in HAPS Feeder Link. 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), London, United Kingdom, 26–29 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/vtc2022-fall57202.2022.10012950>.

49. Optimization of Transmission Power in a 3D UAV-Enabled Communication System / J. Carvajal-Rodríguez et al. Drones. 2025. Vol. 9, no. 7. P. 485. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9070485>.

50. Multi-Agent Technology for a Self-Organized MESH Network Based on a Group of UAVs / V. Savchenko et al. 2024 IEEE 5th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Lviv, Ukraine, 21–23 November 2024. 2024. P. 150–155. URL: <https://doi.org/10.1109/atit64324.2024.11222473>.

51. Zhao R., Tran G. K. Three-Dimensional Trajectory Optimization for UAV-Based Post-Disaster Data Collection. Journal of Sensor and Actuator Networks. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 63. URL: <https://doi.org/10.3390/jsan14030063>.

52. Comprehensive Approach for Radio Equipment Design to Ensure Reliable UAVs Operations / L. Uryvsky et al. *Emerging Networking in the Digital Transformation Age*. Cham, 2023. P. 140–174. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_9).
53. Mathematical Model of Single-channel Signal Search with Two Degrees of Detection in Radio Frequency Monitoring of Mobile Telecommunication Systems / A. Ilnytskyi, O. Tsukanov, O. Symonenko, Y. Pepa, A. Petrenko // *Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering*, 2024, Issue 2(15). – pp. 10-17. <https://doi.org/10.32347/st.2024.2.1102>.
54. High-Altitude-UAV-Relayed Satellite D2D Communications for 6G IoT Network / J. Wang et al. *Drones*. 2024. Vol. 8, no. 10. P. 532. URL: <https://doi.org/10.3390/drones8100532>.
55. 3GPP TS 38.101-5. Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Range 1 and Range 2 NR-RAN enhancement (Release 17). V17.0.0. 2022-03. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3982>.
56. ITU-R S.1257-3. Analytical method to calculate short-term visibility and interference statistics for non-geostationary-satellite orbit FSS systems. Geneva: ITU, 2002. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-S.1257>.
57. ITU-T G.107: The E-model, a computational model for use in transmission planning. Geneva : ITU-T, 2015. 40 p. (Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks). URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107>.
58. ITU-T G.114. One-way transmission time. Series G: Transmission systems and media, digital systems and networks. International Telecommunication Union. 2003. 28 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.114>.
59. On Supporting UAV Based Services in 5G and Beyond Mobile Systems / T. Taleb et al. *IEEE Network*. 2021. Vol. 35, no. 4. P. 220–227. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.021.2000358>.



60. UAV Array-Aided Visible Light Communication with Enhanced Angle Diversity Transmitter / W. Wang et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 18. P. 5752. URL: <https://doi.org/10.3390/s25185752>.
61. Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey / F. Rinaldi et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 165178–165200. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3022981>.
62. Beyond 5G non terrestrial networks for direct-to-device joint communication and positioning services provision: Part I–system scenarios and architectures / R. De Gaudenzi et al. *npj Wireless Technology*. 2026. Vol. 2, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s44459-026-00047-w>.
63. GNSS-5G Hybrid Positioning Based on TOA/AOA Measurements / C. Sun et al. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume III*. Singapore, 2020. P. 527–537. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3715-8\\_47](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3715-8_47).
64. Evaluation of 5G Positioning Based on Uplink SRS and Downlink PRS Under LOS and NLOS Environments / S. S. Shah et al. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 14. P. 7909. URL: <https://doi.org/10.3390/app15147909>.
65. UAV Communications for 5G and Beyond / ed. by Y. Zeng et al. Wiley, 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119575795>.
66. Sakamoto T., Kimura T., Hirata K. UAV Deployment Design Under Incomplete Information with a Connectivity Constraint for UAV-Assisted Networks. *Future Internet*. 2025. Vol. 17, no. 9. P. 401. URL: <https://doi.org/10.3390/fi17090401>.
67. Yao H., Mai T. Intelligent UAV Swarm Routing. *Wireless Networks*. Cham, 2025. P. 59–120. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-96444-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-96444-2_3).
68. UAV-Enabled Split Learning With Privacy Preservation in Internet of Things / Y. Wei et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2025.3586588>.
69. Cellular Connectivity Risk-Aware Flight Path Planning for Bvlos UAV Operations / S. Sajjadi et al. 2025 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Charlotte, NC, USA, 14–17 May 2025. 2025. P. 609–616. URL: <https://doi.org/10.1109/icuas65942.2025.11007859>.

70. Co-existence of Terrestrial and Non-Terrestrial Networks on Adjacent Frequency Bands / L. Sormunen et al. 2022 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Graz, Austria, 6–8 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/asms/spsc55670.2022.9914774>.

71. Rong B., Rutagemwa H. Leveraging Large Language Models for Intelligent Control of 6G Integrated TN-NTN with IoT Service. IEEE Network. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.2024.3384013>.

72. Uryvsky L., Solianikova V. Analysis of spatial-time characteristics of a radio line with multipath within 5G technology. Information and Telecommunication Sciences. 2020. No. 1. P. 87–91. URL: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12020.87-91>.

73. Development of methods to improve noise immunity in the fifth generation mobile networks based on multiposition signals / V. Tolubko et al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 6, no. 9 (96). P. 6–16. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.152713>.

74. Implementation of Cluster-Based UAV Swarm Networks for Emergency Communications / A. F. M. Shahen Shah et al. 2025 9th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS), Gaziantep, Turkiye, 27–28 June 2025. 2025. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/isas66241.2025.11101797>.

75. Multi-HAPS Network Implementation within 3GPP's NTN framework for 5G and beyond / O. Anicho et al. International Journal of Information, Communication Technology and Applications. 2021. Vol. 7, no. 1. P. 7–12. URL: <https://doi.org/10.17972/ijicta20217152>.

76. Anicho O. Implementing 6G via Non-Terrestrial Networks (NTN): Considerations for High Altitude Platform Stations (HAPS). Data Science: Journal of Computing and Applied Informatics. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 106–111. URL: <https://doi.org/10.32734/jocai.v8.i2-16765>.

77. Vitalii Savchenko, Svitlana Lehominova, Taras Dzyuba, Oleksandr Matsko, Ivan Havryliuk, Iryna Novikova. Model of Connectivity in a Mobile MESH Network for a Group of Unmanned Aerial Vehicles. 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends

in Information Theory, ATIT 2022 - Proceedings, 2022, pp. 142-147. URL: <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024235>.

78. A Reinforcement Learning Approach for Fair User Coverage Using UAV Mounted Base Stations Under Energy Constraints / H. V. Abeywickrama et al. IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2020. Vol. 1. P. 67–81. URL: <https://doi.org/10.1109/ojvt.2020.2971594>.

79. Integrated Network Control Architecture for Terrestrial and Non-Terrestrial Network Convergence / V. P. Kafle et al. IEEE Communications Standards Magazine. 2024. Vol. 8, no. 1. P. 12–19. URL: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.0002.2300011>.

80. A Tutorial on Non-Terrestrial Networks: Towards Global and Ubiquitous 6G Connectivity / M. A. Jamshed et al. Foundations and Trends® in Networking. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 160–253. URL: <https://doi.org/10.1561/13000000072>.

81. 5G Multicast Broadcast Services Over Non Terrestrial Networks: An In-Depth Performance Analysis / Á. Ibanez et al. IEEE Transactions on Broadcasting. 2025. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1109/tbc.2025.3582111>.

82. Xiao J., Zhong J. Research on UAV positioning model based on pure azimuth passive positioning. Highlights in Science, Engineering and Technology. 2025. Vol. 138. P. 303–310. URL: <https://doi.org/10.54097/ecx87t68>.

83. Integrated Sensing and Communication in UAV Swarms for Cooperative Multiple Targets Tracking / L. Zhou et al. IEEE Transactions on Mobile Computing. 2022. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1109/tmc.2022.3193499>.

84. UAV Communications for 5G and Beyond / ed. by Y. Zeng et al. Wiley, 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119575795>.

85. High-Precision UAV Positioning Method Based on MLP Integrating UWB and IMU / B. Bao et al. Tsinghua Science and Technology. 2025. Vol. 30, no. 3. P. 1315–1328. URL: <https://doi.org/10.26599/tst.2024.9010106>.

86. Xie J. Research on UAV formation positioning based on passive positioning. Applied and Computational Engineering. 2024. Vol. 107, no. 1. P. 118–126. URL: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2024.18103>.

87. Mousa M., Al-Rubaye S. Intelligent 5G-Aided UAV Positioning in High-Density Environments Using Neural Networks for NLOS Mitigation. *Aerospace*. 2025. Vol. 12, no. 6. P. 543. URL: <https://doi.org/10.3390/aerospace12060543>.
88. Zhang J., Zeng Y., Zhang R. UAV-Enabled Radio Access Network: Multi-Mode Communication and Trajectory Design. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018. Vol. 66, no. 20. P. 5269–5284. URL: <https://doi.org/10.1109/tsp.2018.2866384>.
89. Kholidy H. A. A Novel Blockchain Approach for Continuously Authenticating UAVs to Achieve Zero Trust Principles in 5G-Enabled UAVs. *Communications in Computer and Information Science*. Cham, 2025. P. 1–16. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-86240-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-86240-3_1).
90. Features of Simulating Inertially Stabilized Platforms for UAVs / O. Sushchenko et al. 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD), Kyiv, Ukraine, 19–21 October 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/apuavd53804.2021.9615181>.
91. Enhanced Coverage Path Planning Strategies for UAV Swarms Based on SADQN Algorithm / Z. Xie et al. *Computers, Materials & Continua*. 2025. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.064147>.
92. Song Q., Yang J., Mohajer A. Multi-Objective Resource Optimization in UAV-Enabled Heterogeneous Cellular Networks Using Serverless Federated Learning and Power-Domain NOMA. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2025. Vol. 36, no. 8. URL: <https://doi.org/10.1002/ett.70210>.
93. Mahapatra B., Gupta D., Sharma P. K. UAV-Assisted C-RAN for On-Demand Cellular Coverage: Opportunities and Challenges. *Internet Technology Letters*. 2025. Vol. 8, no. 5. URL: <https://doi.org/10.1002/itl2.70117>.
94. Reliable and Energy-efficient Communications via Collaborative Beamforming for UAV Networks / X. Zheng et al. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/twc.2024.3400523>.
95. Sensing, Communication, and Control Co-design for Energy-Efficient UAV-Aided Data Collection / T. Liang et al. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/lwc.2024.3450184>.

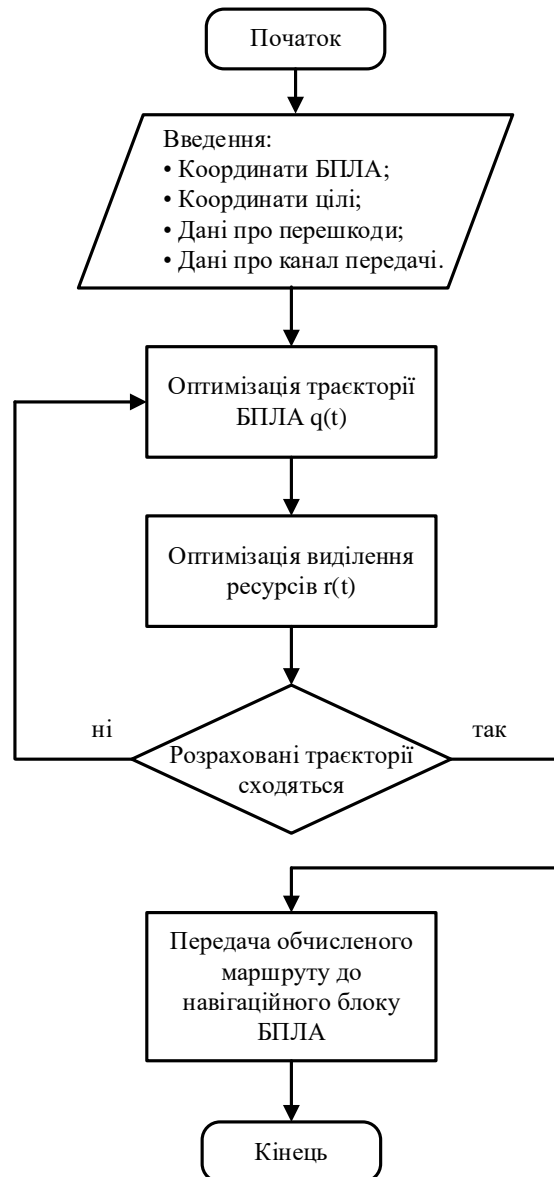
96. Alsharoa A., Yuksel M. Energy Efficient D2D Communications Using Multiple UAV Relays. *IEEE Transactions on Communications*. 2021. Vol. 69, no. 8. P. 5337–5351. URL: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2021.30787>.
97. Worku Y. M., Christodoulou C., Devetsikiotis M. UAV-Mounted Base Station Coverage and Trajectory Optimization Using LSTM-A2C with Attention. *Drones*. 2025. Vol. 9, no. 11. P. 787. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9110787>.
98. Zhao T., Wang H., Ma Q. The coverage method of unmanned aerial vehicle mounted base station sensor network based on relative distance. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2020. Vol. 16, no. 5. P. 155014772092022. URL: <https://doi.org/10.1177/1550147720920220>.
99. Програмна реалізація mavlink-телеметрії для безпілотних авіаційних систем на базі контролерів PIXHAWK / О. Г. Назаренко та ін. *METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL*. 2025. № 2(55). С. 190–201. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-2\(55\)-190-201](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-2(55)-190-201).
100. Костюк, Ю., Складанний, П., Рзаєва, С., Самойленко, Ю., & Коршун, Н. (2025). Інтелектуальні системи керування та захисту в кіберфізичних і хмарних середовищах Smart Grid. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2(30), 125–156. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.956>.
101. Keshetti S., Singh D. S. P. Achieving Zero Trust API Security: Leveraging Advanced OAuth Frameworks. *Journal of Quantum Science and Technology*. 2025. Vol. 2, no. 1. URL: <https://doi.org/10.63345/jqst.v2i1.235>.
102. Secure Communication Channel Establishment: TLS 1.3 (over TCP Fast Open) versus QUIC / S. Chen et al. *Journal of Cryptology*. 2021. Vol. 34, no. 3. URL: <https://doi.org/10.1007/s00145-021-09389-w>.
103. A Survey on Decentralized Identifiers and Verifiable Credentials / C. Mazzocca et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2025.3543197>.
104. Kaptosv L. Applying Postgis for Storage and Processing of Geospatial Data in Logistics System. *The American Journal of Engineering and Technology*. 2025. Vol. 07, no. 08. P. 318–327. URL: <https://doi.org/10.37547/tajet/volume07issue08-28>.

105. (2023) Designing Secured Services for Authentication, Authorization, and Accounting of Users Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems / Shevchuk, D et al. Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II. 2023. pp. 207-225.

106. Deployments of O-RAN-based Non-Terrestrial Networks. The O-RAN ALLIANCE. White Paper. O-RAN-2025.04.02.WP.O-RAN\_NTN\_Deployments-v08.4. February 2025. P. 1-21.

107. 3GPP TS 22.261 V18.0.0 (2023-12). Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 18). Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2023. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107>.

Алгоритм обчислення траєкторії БПЛА з врахуванням розподілу комунікаційних ресурсів



## Запит створення моделі даних PostgreSQL + PostGIS

```
CREATE EXTENSION IF NOT EXISTS postgis;

CREATE TABLE haps_nodes (
  id SERIAL PRIMARY KEY,
  name TEXT,
  status TEXT,
  last_seen TIMESTAMP WITH TIME ZONE DEFAULT now(),
  location GEOGRAPHY(POINT,4326),
  metadata JSONB
);

CREATE TABLE serving_nodes (
  id SERIAL PRIMARY KEY,
  type TEXT,
  name TEXT,
  location GEOGRAPHY(POINT,4326),
  status TEXT,
  metadata JSONB
);

CREATE TABLE uav_telemetry (
  id BIGSERIAL PRIMARY KEY,
  uav_id TEXT NOT NULL,
  ts TIMESTAMP WITH TIME ZONE NOT NULL,
  received_at TIMESTAMP WITH TIME ZONE DEFAULT now(),
  location GEOGRAPHY(POINT,4326),
  altitude_m FLOAT,
  battery_percent SMALLINT,
  status TEXT,
  connected_node_id INT REFERENCES serving_nodes(id),
  signal_strength FLOAT,
  extra JSONB,
  UNIQUE(uav_id, ts)
);

CREATE INDEX idx_uav_loc ON uav_telemetry USING GIST(location);

CREATE TABLE ue_observations (
  id BIGSERIAL PRIMARY KEY,
  ts TIMESTAMP WITH TIME ZONE NOT NULL,
  location GEOGRAPHY(POINT,4326),
  ue_count INT,
  metadata JSONB
);

CREATE TABLE faults (
  id BIGSERIAL PRIMARY KEY,
  reported_by TEXT,
  ts TIMESTAMP WITH TIME ZONE DEFAULT now(),
```



```
target_type TEXT,  
target_id TEXT,  
severity TEXT,  
description TEXT,  
resolved BOOL DEFAULT FALSE  
);
```

```
CREATE TABLE compute_jobs (  
  id BIGSERIAL PRIMARY KEY,  
  created_at TIMESTAMP WITH TIME ZONE DEFAULT now(),  
  assigned_to TEXT,  
  payload JSONB,  
  status TEXT DEFAULT 'pending',  
  created_by TEXT,  
  result JSONB,  
  due_by TIMESTAMP WITH TIME ZONE  
);
```

## Основні ORM-моделі бази даних

```

import datetime as dt
from typing import Optional, Any

from sqlalchemy import (
    Column, Integer, BigInteger, String, Float, Boolean, ForeignKey,
    DateTime, JSON, Enum, UniqueConstraint, text
)
from sqlalchemy.ext.asyncio import AsyncAttrs
from sqlalchemy.orm import DeclarativeBase, relationship, Mapped, mapped_column
from geoalchemy2 import Geography

class Base(AsyncAttrs, DeclarativeBase):
    pass

class UAVDevice(Base):
    __tablename__ = "uav_devices"

    uav_id: Mapped[str] = mapped_column(primary_key=True)
    model: Mapped[Optional[str]]
    hw_version: Mapped[Optional[str]]
    sw_version: Mapped[Optional[str]]
    capabilities: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSONB)
    registered_at: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(dt.datetime, server_default=text("now()"))
    last_seen: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(dt.datetime, server_default=text("now()"))
    battery_percent: Mapped[Optional[int]]
    status: Mapped[Optional[str]]
    location = mapped_column(Geography(geometry_type="POINT", srid=4326), nullable=True)

class HAPSNode(Base):
    __tablename__ = "haps_nodes"

    id: Mapped[int] = mapped_column(primary_key=True, autoincrement=True)
    name: Mapped[str] = mapped_column(String(64), unique=True)
    status: Mapped[str] = mapped_column(String(32), default="active")
    last_seen: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True),
server_default=text("now()"))
    location = Column(Geography(geometry_type="POINT", srid=4326))
    metadata: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSON)

    serving_nodes = relationship("ServingNode", back_populates="haps_node")
    compute_jobs = relationship("ComputeJob", back_populates="haps_node")

class ServingNode(Base):
    __tablename__ = "serving_nodes"

    id: Mapped[int] = mapped_column(primary_key=True)
    haps_id: Mapped[int] = mapped_column(ForeignKey("haps_nodes.id", ondelete="SET NULL"),
nullable=True)
    type: Mapped[str] = mapped_column(String(32))
    name: Mapped[str] = mapped_column(String(64))
    location = Column(Geography(geometry_type="POINT", srid=4326))

```

```
status: Mapped[str] = mapped_column(String(32), default="active")
metadata: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSON)
```

```
haps_node = relationship("HAPSNode", back_populates="serving_nodes")
uav_links = relationship("UAVTelemetry", back_populates="connected_node")
```

```
class UAVTelemetry(Base):
```

```
    __tablename__ = "uav_telemetry"
```

```
    id: Mapped[int] = mapped_column(BigInteger, primary_key=True, autoincrement=True)
```

```
    uav_id: Mapped[str] = mapped_column(String(64), index=True)
```

```
    ts: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True))
```

```
    received_at: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True),
```

```
server_default=text("now()"))
```

```
    location = Column(Geography(geometry_type="POINT", srid=4326))
```

```
    altitude_m: Mapped[Optional[float]]
```

```
    battery_percent: Mapped[Optional[int]]
```

```
    status: Mapped[Optional[str]]
```

```
    connected_node_id: Mapped[Optional[int]] = mapped_column(ForeignKey("serving_nodes.id",
ondelete="SET NULL"))
```

```
    signal_strength: Mapped[Optional[float]]
```

```
    extra: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSON)
```

```
    connected_node = relationship("ServingNode", back_populates="uav_links")
```

```
    __table_args__ = (UniqueConstraint("uav_id", "ts", name="uav_ts_unique"),)
```

```
class UAVConfig(Base):
```

```
    __tablename__ = "uav_configs"
```

```
    uav_id: Mapped[str] = mapped_column(ForeignKey("uav_devices.uav_id", ondelete="CASCADE"),
primary_key=True)
```

```
    telemetry_interval_s: Mapped[int] = mapped_column(default=30)
```

```
    max_offline_buffer: Mapped[int] = mapped_column(default=200)
```

```
    allowed_compute_types: Mapped[list[str]] = mapped_column(JSONB, default=list)
```

```
    updated_at: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(dt.datetime, server_default=text("now()"))
```

```
    uav = relationship("UAVDevice", backref="config", lazy="joined")
```

```
class UEObservation(Base):
```

```
    __tablename__ = "ue_observations"
```

```
    id: Mapped[int] = mapped_column(BigInteger, primary_key=True, autoincrement=True)
```

```
    ts: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True))
```

```
    location = Column(Geography(geometry_type="POINT", srid=4326))
```

```
    ue_count: Mapped[int]
```

```
    metadata: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSON)
```

```
class FaultReport(Base):
```

```
    __tablename__ = "fault_reports"
```

```
    id: Mapped[int] = mapped_column(BigInteger, primary_key=True, autoincrement=True)
```

```
    reported_by: Mapped[Optional[str]]
```

```
    ts: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True), server_default=text("now()"))
```

```
    target_type: Mapped[str] = mapped_column(String(32))
```

```

target_id: Mapped[Optional[str]]
severity: Mapped[str] = mapped_column(String(16))
description: Mapped[Optional[str]]
resolved: Mapped[bool] = mapped_column(Boolean, default=False)

```

```
class ComputeJob(Base):
```

```
    __tablename__ = "compute_jobs"
```

```

    id: Mapped[int] = mapped_column(BigInteger, primary_key=True, autoincrement=True)
    haps_id: Mapped[Optional[int]] = mapped_column(ForeignKey("haps_nodes.id", ondelete="SET
NULL"))
    created_at: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True),
server_default=text("now()"))
    assigned_to: Mapped[Optional[str]] = mapped_column(String(64))
    payload: Mapped[dict] = mapped_column(JSONB)
    status: Mapped[str] = mapped_column(String(32), default="pending")
    created_by: Mapped[Optional[str]] = mapped_column(String(64))
    result: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSONB)
    due_by: Mapped[Optional[dt.datetime]] = mapped_column(DateTime(timezone=True))
    started_at: Mapped[Optional[dt.datetime]] = mapped_column(DateTime(timezone=True),
nullable=True)
    finished_at: Mapped[Optional[dt.datetime]] = mapped_column(DateTime(timezone=True),
nullable=True)

```

```
    haps_node = relationship("HAPSNode", back_populates="compute_jobs");
```

```
class NetworkLink(Base):
```

```
    __tablename__ = "network_links"
```

```

    id: Mapped[int] = mapped_column(BigInteger, primary_key=True, autoincrement=True)
    src_node: Mapped[str] = mapped_column(String(64))
    dst_node: Mapped[str] = mapped_column(String(64))
    link_type: Mapped[str] = mapped_column(String(32))
    latency_ms: Mapped[Optional[float]]
    bandwidth_mbps: Mapped[Optional[float]]
    status: Mapped[str] = mapped_column(String(32), default="up")
    last_update: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True),
server_default=text("now()"))

```

```
class TrafficStat(Base):
```

```
    __tablename__ = "traffic_stats"
```

```

    id: Mapped[int] = mapped_column(BigInteger, primary_key=True, autoincrement=True)
    node_id: Mapped[str] = mapped_column(String(64))
    ts: Mapped[dt.datetime] = mapped_column(DateTime(timezone=True))
    throughput_mbps: Mapped[float]
    packet_loss: Mapped[Optional[float]]
    latency_ms: Mapped[Optional[float]]
    metadata: Mapped[Optional[dict]] = mapped_column(JSON)

```

## ЕНДПОІНТИ ВЗАЄМОДІЇ БПІЛА З HAPS

```

from fastapi import APIRouter, Depends, HTTPException, status, BackgroundTasks
from typing import List, Optional, Dict, Any
from datetime import datetime, timezone
from pydantic import BaseModel, Field

from sqlalchemy.ext.asyncio import AsyncSession
from db import get_session
from auth import require_api_key

from schemas.uav import UAVTelemetryCreate, UAVTelemetryRead
from schemas.compute import ComputeJobRead, ComputeJobCreate, ComputeJobBase

from app.utils.uav import get_nearest_haps, update_uav_heartbeat, get_or_create_uav_config, import
insert_uav_telemetry, insert_uav_telemetry_batch, get_available_jobs_for_uav, claim_job_for_uav

router = APIRouter(prefix="/uav", tags=["uav"], dependencies=[Depends(require_api_key)])

@router.post("/register", response_model=UAVRegisterOut)
async def register_uav(payload: UAVRegisterIn, session: AsyncSession = Depends(get_session)):
    now = datetime.now(timezone.utc)

    existing = await session.scalar(select(UAVDevice).where(UAVDevice.uav_id == payload.uav_id))

    if existing:
        existing.model = payload.model or existing.model
        existing.hw_version = payload.hw_version or existing.hw_version
        existing.sw_version = payload.sw_version or existing.sw_version
        existing.capabilities = payload.capabilities or existing.capabilities
        existing.last_seen = now
        message = "UAV re-registered (updated last_seen)"
    else:
        new_uav = UAVDevice(
            uav_id=payload.uav_id,
            model=payload.model,
            hw_version=payload.hw_version,
            sw_version=payload.sw_version,
            capabilities=payload.capabilities,
            registered_at=now,
            last_seen=now
        )
        session.add(new_uav)
        message = "UAV successfully registered"

    await session.commit()

    assigned_haps_id = None
    if payload.capabilities and "location" in payload.capabilities:
        loc = payload.capabilities["location"]
        lat, lon = loc.get("lat"), loc.get("lon")
        if lat is not None and lon is not None:

```

```
    assigned_haps_id = await get_nearest_haps(session, lat, lon)
```

```
    return UAVRegisterOut(
        uav_id=payload.uav_id,
        registered=True,
        assigned_haps_id=assigned_haps_id,
        message=message
    )
```

```
@router.post("/heartbeat", response_model=dict)
async def heartbeat(payload: UAVHeartbeatIn, session: AsyncSession = Depends(get_session)):
    lat = payload.location.get("lat") if payload.location else None
    lon = payload.location.get("lon") if payload.location else None
```

```
    success = await update_uav_heartbeat(
        session=session,
        uav_id=payload.uav_id,
        battery_percent=payload.battery_percent,
        status=payload.status,
        lat=lat,
        lon=lon,
    )
```

```
    if not success:
        raise HTTPException(
            status_code=404,
            detail=f"UAV '{payload.uav_id}' not found. Please register first."
        )
```

```
    return {
        "ok": True,
        "uav_id": payload.uav_id,
        "updated_at": datetime.now(timezone.utc).isoformat(),
    }
```

```
@router.get("/{uav_id}/config", response_model=UAVConfigOut)
async def get_uav_config(uav_id: str, session: AsyncSession = Depends(get_session)):
    uav_exists = await session.scalar(select(UAVDevice.uav_id).where(UAVDevice.uav_id == uav_id))
    if not uav_exists:
        raise HTTPException(status_code=404, detail=f"UAV '{uav_id}' not found")

    config = await get_or_create_uav_config(session, uav_id)
    return UAVConfigOut(
        uav_id=uav_id,
        telemetry_interval_s=config.telemetry_interval_s,
        max_offline_buffer=config.max_offline_buffer,
        allowed_compute_types=config.allowed_compute_types
    )
```

```
@router.post("/telemetry", response_model=dict)
async def post_telemetry(payload: UAVTelemetryCreate, session: AsyncSession = Depends(get_session)):
```

```
result = await insert_uav_telemetry(session, payload)
```

```
return {
    "ok": True,
    "uav_id": payload.uav_id,
    "ts": payload.ts.isoformat(),
    "inserted_id": result["inserted_id"],
    "skipped_duplicate": result["skipped"]
}
```

```
@router.post("/telemetry/batch", response_model=dict)
```

```
async def post_telemetry_batch(
    payload: List[UAVTelemetryCreate],
    session: AsyncSession = Depends(get_session)
```

```
):
    result = await insert_uav_telemetry_batch(session, payload)
```

```
return {
    "ok": True,
    "inserted": result["inserted"],
    "skipped": result["skipped"],
    "total_received": len(payload)
}
```

```
@router.get("/{uav_id}/jobs", response_model=List[ComputeJobRead])
```

```
async def get_jobs_for_uav(uav_id: str, limit: int = 10, session: AsyncSession = Depends(get_session)):
```

```
    if limit <= 0:
        raise HTTPException(status_code=400, detail="limit must be > 0")
```

```
    jobs = await get_available_jobs_for_uav(session, uav_id, limit=limit)
    return jobs
```

```
@router.post("/{uav_id}/jobs/{job_id}/ack", response_model=dict)
```

```
async def ack_job(uav_id: str, job_id: int, session: AsyncSession = Depends(get_session)):
```

```
    result = await claim_job_for_uav(session, job_id, uav_id)
```

```
    if result.get("claimed"):
        job_info = result["job"]
        return {
            "ok": True,
            "uav_id": uav_id,
            "job_id": job_info["id"],
            "status": job_info["status"],
            "started_at": job_info["started_at"].isoformat() if job_info.get("started_at") else None
        }
```

```
    reason = result.get("reason", "unknown")
```

```
    if reason == "not_found":
```

```
        raise HTTPException(status_code=status.HTTP_404_NOT_FOUND, detail="Job not found")
```

```
    if reason == "expired":
```

```
        raise HTTPException(status_code=status.HTTP_400_BAD_REQUEST, detail="Job is expired")
```

```
    if reason.startswith("invalid_status"):
```

```
        raise HTTPException(status_code=status.HTTP_409_CONFLICT, detail=f'Job not claimable
(status: {reason.split(':',1)[1]})")
    if reason.startswith("assigned_to_other"):
        other = reason.split(":", 1)[1]
        raise HTTPException(status_code=status.HTTP_409_CONFLICT, detail=f'Job already assigned to
another UAV: {other}")

    raise HTTPException(status_code=status.HTTP_409_CONFLICT, detail=f'Unable to claim job
({reason})")
```



## Хелпер-функції для звернень в ендпоінтах взаємодії БПЛА та HAPS

```

from typing import Optional
from sqlalchemy.ext.asyncio import AsyncSession
from sqlalchemy import select, func
from geoalchemy2.shape import from_shape
from shapely.geometry import Point
from models import HAPSNode

async def get_nearest_haps(session: AsyncSession, lat: float, lon: float) -> Optional[int]:
    uav_point = from_shape(Point(lon, lat), srid=4326)

    q = (
        select(
            HAPSNode.id,
            func.ST_DistanceSphere(HAPSNode.location, uav_point).label("distance_m")
        )
        .order_by("distance_m")
        .limit(1)
    )

    result = await session.execute(q)
    row = result.first()

    if row:
        return row.id
    return None

async def update_uav_heartbeat(
    session: AsyncSession,
    uav_id: str,
    battery_percent: int | None = None,
    status: str | None = None,
    lat: float | None = None,
    lon: float | None = None
) -> bool:
    now = datetime.now(timezone.utc)
    uav = await session.scalar(select(UAVDevice).where(UAVDevice.uav_id == uav_id))

    if not uav:
        return False

    uav.last_seen = now
    if battery_percent is not None:
        uav.battery_percent = battery_percent
    if status:
        uav.status = status
    if lat is not None and lon is not None:
        uav.location = from_shape(Point(lon, lat), srid=4326)

    await session.commit()

```

```
return True
```

```
async def get_or_create_uav_config(session: AsyncSession, uav_id: str) -> UAVConfig:
    config = await session.scalar(select(UAVConfig).where(UAVConfig.uav_id == uav_id))
    if config:
        return config
```

```
    config = UAVConfig(
        uav_id=uav_id,
        telemetry_interval_s=DEFAULT_CONFIG["telemetry_interval_s"],
        max_offline_buffer=DEFAULT_CONFIG["max_offline_buffer"],
        allowed_compute_types=DEFAULT_CONFIG["allowed_compute_types"],
        updated_at=datetime.now(timezone.utc)
    )
    session.add(config)
    await session.commit()
    await session.refresh(config)
    return config
```

```
async def insert_uav_telemetry(session: AsyncSession, payload: UAVTelemetryCreate) -> Dict:
    existing = await session.scalar(
        select(UAVTelemetry).where(
            UAVTelemetry.uav_id == payload.uav_id,
            UAVTelemetry.ts == payload.ts
        )
    )
    if existing:
        return {"inserted_id": existing.id, "skipped": True}
```

```
    lon = payload.location.lon
    lat = payload.location.lat
    geog_point = from_shape(Point(lon, lat), srid=4326)
```

```
    telemetry = UAVTelemetry(
        uav_id=payload.uav_id,
        ts=payload.ts,
        location=geog_point,
        altitude_m=payload.altitude_m,
        battery_percent=payload.battery_percent,
        status=payload.status,
        connected_node_id=payload.connected_node_id,
        signal_strength=payload.signal_strength,
        extra=payload.extra
    )
```

```
    session.add(telemetry)
```

```
    uav = await session.scalar(select(UAVDevice).where(UAVDevice.uav_id == payload.uav_id))
    if uav:
        now = datetime.now(timezone.utc)
```

```

uav.last_seen = now
if payload.battery_percent is not None:
    uav.battery_percent = payload.battery_percent
if payload.status:
    uav.status = payload.status
uav.location = geog_point

```

```

await session.commit()
await session.refresh(telemetry)

```

```

return {"inserted_id": telemetry.id, "skipped": False}

```

```

async def insert_uav_telemetry_batch(session: AsyncSession, payloads: List[UAVTelemetryCreate]) ->
Dict:

```

```

    if not payloads:
        return {"inserted": 0, "skipped": 0}

```

```

    uav_updates: dict[str, UAVTelemetryCreate] = {}

```

```

    inserted_count = 0
    skipped_count = 0

```

```

    for p in payloads:
        existing = await session.scalar(
            select(UAVTelemetry.id)
            .where(UAVTelemetry.uav_id == p.uav_id, UAVTelemetry.ts == p.ts)
        )
        if existing:
            skipped_count += 1
            continue

```

```

    point = from_shape(Point(p.location.lon, p.location.lat), srid=4326)

```

```

    telem = UAVTelemetry(
        uav_id=p.uav_id,
        ts=p.ts,
        location=point,
        altitude_m=p.altitude_m,
        battery_percent=p.battery_percent,
        status=p.status,
        connected_node_id=p.connected_node_id,
        signal_strength=p.signal_strength,
        extra=p.extra,
    )

```

```

    session.add(telem)
    inserted_count += 1

```

```

    if (
        p.uav_id not in uav_updates
        or p.ts > uav_updates[p.uav_id].ts
    ):
        uav_updates[p.uav_id] = p

```

```
await session.commit()
```

```
now = datetime.now(timezone.utc)
for uav_id, latest in uav_updates.items():
    uav = await session.scalar(select(UAVDevice).where(UAVDevice.uav_id == uav_id))
    if not uav:
        continue
    uav.last_seen = now
    if latest.battery_percent is not None:
        uav.battery_percent = latest.battery_percent
    if latest.status:
        uav.status = latest.status
    uav.location = from_shape(Point(latest.location.lon, latest.location.lat), srid=4326)
```

```
await session.commit()
```

```
return {"inserted": inserted_count, "skipped": skipped_count}
```

```
async def get_available_jobs_for_uav(session: AsyncSession, uav_id: str, limit: int = 10) ->
```

```
List[ComputeJob]:
```

```
    now = datetime.now(timezone.utc)
```

```
    q = (
        select(ComputeJob)
        .where(
            ComputeJob.status == "pending",
            or_(ComputeJob.assigned_to == uav_id, ComputeJob.assigned_to == None),
            or_(ComputeJob.due_by == None, ComputeJob.due_by >= now)
        )
        .order_by(ComputeJob.created_at)
        .limit(limit * 3)
    )
```

```
cand_res = await session.scalars(q)
```

```
candidates: List[ComputeJob] = cand_res.all()
```

```
cfg = await session.scalar(select(UAVConfig).where(UAVConfig.uav_id == uav_id))
```

```
allowed_types = None
```

```
if cfg and getattr(cfg, "allowed_compute_types", None):
```

```
    allowed_types = list(cfg.allowed_compute_types)
```

```
selected: List[ComputeJob] = []
```

```
for job in candidates:
```

```
    if allowed_types:
```

```
        job_type = None
```

```
        try:
```

```
            if isinstance(job.payload, dict):
```

```
                job_type = job.payload.get("type")
```

```
        except Exception:
```

```
            job_type = None
```

```

    if job_type is not None and job_type not in allowed_types:
        continue

```

```

    selected.append(job)
    if len(selected) >= limit:
        break

```

```

return selected

```

```

async def claim_job_for_uav(session: AsyncSession, job_id: int, uav_id: str) -> Dict[str, Any]:
    now = datetime.now(timezone.utc)

```

```

    upd = (
        update(ComputeJob)
        .where(
            ComputeJob.id == job_id,
            ComputeJob.status == "pending",
            or_(ComputeJob.assigned_to == None, ComputeJob.assigned_to == uav_id),
            or_(ComputeJob.due_by == None, ComputeJob.due_by >= now)
        )
        .values(
            assigned_to=uav_id,
            status="running",
            started_at=now
        )
        .returning(
            ComputeJob.id, ComputeJob.assigned_to, ComputeJob.status,
            ComputeJob.payload, ComputeJob.created_at, ComputeJob.due_by, ComputeJob.started_at
        )
    )

```

```

    res = await session.execute(upd)
    row = res.first()
    if row:
        await session.commit()
        job_row = {
            "id": row.id,
            "assigned_to": row.assigned_to,
            "status": row.status,
            "payload": row.payload,
            "created_at": row.created_at,
            "due_by": row.due_by,
            "started_at": row.started_at
        }
        return {"claimed": True, "job": job_row}

```

```

    job = await session.get(ComputeJob, job_id)
    if job is None:
        return {"claimed": False, "reason": "not_found"}

```

```

    now = datetime.now(timezone.utc)

```

```
if job.due_by is not None and job.due_by < now:
    return {"claimed": False, "reason": "expired"}

if job.status != "pending":
    return {"claimed": False, "reason": f"invalid_status:{job.status}"}

if job.assigned_to is not None and job.assigned_to != uav_id:
    return {"claimed": False, "reason": f"assigned_to_other:{job.assigned_to}"}

return {"claimed": False, "reason": "unknown"}
```

## Файл ініціалізації API на стороні HAPS

```

import asyncio
import logging

from fastapi import FastAPI
from fastapi.middleware.cors import

from sqlalchemy.ext.asyncio import create_async_engine, async_sessionmaker
from sqlalchemy.orm import declarative_base

from app.core.config import DATABASE_URL

from routers.uav_routes import router as uav_router
from routers.haps_routes import router as haps_router
from routers.admin_routes import router as admin_router

Base = declarative_base()

async_engine = create_async_engine(DATABASE_URL, echo=False, future=True)
AsyncSessionLocal = async_sessionmaker(bind=async_engine, expire_on_commit=False)

async def get_session():
    async with AsyncSessionLocal() as session:
        yield session

from models import (
    UAVDevice,
    UAVTelemetry,
    UAVConfig,
    HAPSNode,
    ComputeJob,
)

app = FastAPI(
    title="HAPS NTN API",
    version="0.1.0",
    description="Non-Terrestrial Network backend API for UAV-HAPS coordination",
)

app.add_middleware(
    cors.CORSMiddleware,
    allow_origins=cors.allow_origins,
    allow_credentials=cors.allow_credentials,
    allow_methods=cors.allow_methods,
    allow_headers=cors.allow_headers,
)

@app.on_event("startup")

```

```

async def on_startup():
    logging.info("Starting HAPS NTN API service...")

    async with async_engine.begin() as conn:
        await conn.run_sync(Base.metadata.create_all)

    logging.info("Database connected and models initialized.")

@app.on_event("shutdown")
async def on_shutdown():
    logging.info("Shutting down HAPS NTN API service...")
    await async_engine.dispose()
    logging.info("Engine disposed.")

app.include_router(uav_router)
app.include_router(haps_router)
app.include_router(admin_router)

@app.get("/")
async def root():
    return {"message": "HAPS NTN API is running", "status": "ok"}

```



## Програмна реалізація взаємодії на стороні БПЛА

```

import asyncio
import json
import sqlite3
from typing import Any, Dict, List, Optional
from datetime import datetime, timezone

from app.core.config import API_URL, API_KEY, UAV_ID

import httpx

HEADERS = {"x-api-key": API_KEY, "content-type": "application/json"}

class BufferDB:
    def __init__(self, path: str = "uav_buffer.db"):
        self.conn = sqlite3.connect(path, check_same_thread=False)
        self._init_tables()

    def _init_tables(self):
        c = self.conn.cursor()
        c.execute(
            """CREATE TABLE IF NOT EXISTS telemetry_buffer (
                id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
                payload TEXT,
                created_at TEXT
            )"""
        )
        c.execute(
            """CREATE TABLE IF NOT EXISTS result_buffer (
                id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
                payload TEXT,
                created_at TEXT
            )"""
        )
        self.conn.commit()

    def add_telemetry(self, payload: dict):
        self.conn.execute(
            "INSERT INTO telemetry_buffer (payload, created_at) VALUES (?,?)",
            (json.dumps(payload), datetime.now(timezone.utc).isoformat()),
        )
        self.conn.commit()

    def get_telemetry_batch(self, limit: int = 50) -> List[Dict]:
        cur = self.conn.execute("SELECT id, payload FROM telemetry_buffer ORDER BY id LIMIT ?",
            (limit,))
        rows = cur.fetchall()
        return [{"id": r[0], "payload": json.loads(r[1])} for r in rows]

```

```

def delete_telemetry_ids(self, ids: List[int]):
    if not ids:
        return
    q = "DELETE FROM telemetry_buffer WHERE id IN ({})".format(",".join("'" * len(ids)))
    self.conn.execute(q, ids)
    self.conn.commit()

def add_result(self, payload: dict):
    self.conn.execute(
        "INSERT INTO result_buffer (payload, created_at) VALUES (?,?)",
        (json.dumps(payload), datetime.now(timezone.utc).isoformat()),
    )
    self.conn.commit()

def get_result_batch(self, limit: int = 50) -> List[Dict]:
    cur = self.conn.execute("SELECT id, payload FROM result_buffer ORDER BY id LIMIT ?",
    (limit,))
    rows = cur.fetchall()
    return [{"id": r[0], "payload": json.loads(r[1])} for r in rows]

def delete_result_ids(self, ids: List[int]):
    if not ids:
        return
    q = "DELETE FROM result_buffer WHERE id IN ({})".format(",".join("'" * len(ids)))
    self.conn.execute(q, ids)
    self.conn.commit()

class UAVClient:
    def __init__(self, api_url: str, uav_id: str, api_key: str, buffer_db: BufferDB):
        self.api_url = api_url.rstrip("/")
        self.uav_id = uav_id
        self.api_key = api_key
        self.headers = {"x-api-key": api_key, "content-type": "application/json"}
        self.client = httpx.AsyncClient(timeout=10.0)
        self.buf = buffer_db

    async def _post(self, path: str, json_body: dict) -> Optional[httpx.Response]:
        url = f"{self.api_url}{path}"
        try:
            r = await self.client.post(url, json=json_body, headers=self.headers)
            return r
        except (httpx.RequestError, httpx.HTTPStatusError):
            return None

    async def _get(self, path: str, params: dict = None) -> Optional[httpx.Response]:
        url = f"{self.api_url}{path}"
        try:
            r = await self.client.get(url, params=params, headers=self.headers)
            return r
        except (httpx.RequestError, httpx.HTTPStatusError):
            return None

```

```

async def register(self, model: Optional[str] = None, hw_version: Optional[str] = None,
                    sw_version: Optional[str] = None, capabilities: Optional[Dict] = None) -> Dict[str, Any]:
    payload = {
        "uav_id": self.uav_id,
        "model": model,
        "hw_version": hw_version,
        "sw_version": sw_version,
        "capabilities": capabilities or {},
    }
    r = await self._post("/uav/register", payload)
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return {"registered": False, "error": "network"}

async def get_config(self) -> Dict[str, Any]:
    r = await self._get(f"/uav/{self.uav_id}/config")
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return {}

async def heartbeat(self, battery_percent: Optional[int] = None, status: Optional[str] = None,
                    location: Optional[Dict] = None) -> Dict[str, Any]:
    payload = {
        "uav_id": self.uav_id,
        "ts": datetime.now(timezone.utc).isoformat(),
        "battery_percent": battery_percent,
        "status": status,
        "location": location,
    }
    r = await self._post("/uav/heartbeat", payload)
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return {"ok": False, "error": "network"}

async def send_telemetry(self, telemetry: Dict[str, Any]) -> Dict[str, Any]:
    telemetry.setdefault("uav_id", self.uav_id)
    if "ts" not in telemetry:
        telemetry["ts"] = datetime.now(timezone.utc).isoformat()

    r = await self._post("/uav/telemetry", telemetry)
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    self.buf.add_telemetry(telemetry)
    return {"ok": False, "buffered": True}

async def flush_telemetry_buffer(self, batch_size: int = 50) -> Dict[str, Any]:
    batch = self.buf.get_telemetry_batch(limit=batch_size)
    if not batch:
        return {"flushed": 0}
    payloads = [b["payload"] for b in batch]
    r = await self._post("/uav/telemetry/batch", payloads)

```

```

if r and r.status_code < 400:
    ids = [b["id"] for b in batch]
    self.buf.delete_telemetry_ids(ids)
    return {"flushed": len(ids)}
return {"flushed": 0}

async def get_jobs(self, limit: int = 5) -> List[Dict[str, Any]]:
    r = await self._get(f"/uav/{self.uav_id}/jobs", params={"limit": limit})
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return []

async def ack_job(self, job_id: int) -> Dict[str, Any]:
    r = await self._post(f"/uav/{self.uav_id}/jobs/{job_id}/ack", {})
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return {"ok": False, "error": "network_or_conflict"}

async def post_job_result(self, job_id: int, status: str, result: Optional[Dict] = None,
                          started_at: Optional[str] = None, finished_at: Optional[str] = None) -> Dict[str, Any]:
    payload = {
        "uav_id": self.uav_id,
        "job_id": job_id,
        "status": status,
        "result": result or {},
        "started_at": started_at,
        "finished_at": finished_at or datetime.now(timezone.utc).isoformat()
    }
    r = await self._post(f"/uav/{self.uav_id}/jobs/{job_id}/result", payload)
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    self.buf.add_result(payload)
    return {"ok": False, "buffered": True}

async def flush_result_buffer(self, batch_size: int = 50) -> Dict[str, Any]:
    batch = self.buf.get_result_batch(limit=batch_size)
    if not batch:
        return {"flushed": 0}
    success_ids = []
    for b in batch:
        payload = b["payload"]
        job_id = payload.get("job_id")
        r = await self._post(f"/uav/{self.uav_id}/jobs/{job_id}/result", payload)
        if r and r.status_code < 400:
            success_ids.append(b["id"])
    if success_ids:
        self.buf.delete_result_ids(success_ids)
    return {"flushed": len(success_ids)}

async def post_ue_observation(self, obs: Dict[str, Any]) -> Dict[str, Any]:
    r = await self._post(f"/uav/{self.uav_id}/ue_observations", obs)
    if r and r.status_code < 400:

```

```

        return r.json()
    return {"ok": False, "error": "network"}

async def report_fault(self, fault: Dict[str, Any]) -> Dict[str, Any]:
    r = await self._post(f"/uav/{self.uav_id}/report_fault", fault)
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return {"ok": False, "error": "network"}

async def poll_commands(self, timeout_s: int = 0) -> List[Dict[str, Any]]:
    params = {"timeout_s": timeout_s} if timeout_s else None
    r = await self._get(f"/uav/{self.uav_id}/commands", params=params)
    if r and r.status_code < 400:
        return r.json()
    return []

async def close(self):
    await self.client.aclose()

async def main():
    buf = BufferDB()
    client = UAVClient(API_URL, UAV_ID, API_KEY, buf)

    print("Registering...")
    print(await client.register(model="DJI-NTN", hw_version="r1", sw_version="0.1.0",
                               capabilities={"camera": True, "edge_compute": ["image_processing"]}))

    print("Get config...")
    cfg = await client.get_config()
    print(cfg)

    print("Heartbeat...")
    print(await client.heartbeat(battery_percent=88, status="idle", location={"lat": 50.45, "lon": 30.52}))

    telemetry = {
        "ts": datetime.now(timezone.utc).isoformat(),
        "location": {"lat": 50.45, "lon": 30.52},
        "altitude_m": 120.0,
        "battery_percent": 88,
        "status": "idle",
        "signal_strength": -72.5
    }
    print("Send telemetry", await client.send_telemetry(telemetry))

    print("Flush telemetry buffer:", await client.flush_telemetry_buffer())
    print("Flush result buffer:", await client.flush_result_buffer())

    jobs = await client.get_jobs(limit=3)
    print("Jobs:", jobs)

    if jobs:

```

```
job = jobs[0]
job_id = job["id"]
print("Ack/claim job:", await client.ack_job(job_id))
job_result = {"output": "hello-from-uav", "job_payload": job.get("payload")}
print("Report job result:", await client.post_job_result(job_id, status="done", result=job_result))

print("Commands:", await client.poll_commands())

await client.close()

if __name__ == "__main__":
    asyncio.run(main())
```

**Акти впровадження результатів  
дисертаційних досліджень**

**Товариство з обмеженою відповідальністю  
«СД Профзв'язок»**

08130, Київська обл., Кієво-Святошинський р-н, с. Петропавлівська Борщагівка,  
вул. Велика Кільцева Дорога, будинок 4А; ЄДРПОУ 38061866;  
п/р UA19305299000026008025016472 в АТ КБ «ПРИВАТБАНК»

**А К Т**

**про впровадження результатів наукового дослідження здобувача  
наукового ступеня доктора філософії  
Яковця Всеволода**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження здобувача кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій Яковця Всеволода Петровича на тему «Метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності» за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка» впроваджено в діяльність ТОВ «СД Профзв'язок».

У межах дисертаційного дослідження здобувачем запропоновано розроблений ним метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності, а також удосконалену математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і користувачем з урахуванням замирання сигналу та інші складові, що забезпечують підвищення ефективності функціонування телекомунікаційної мережі.

Практичну цінність для ТОВ «СД Профзв'язок» становлять наступні наукові результати:

- Метод визначення оптимального місцезнаходження базових станцій для обслуговування наземних користувачів, який на відміну від існуючих, забезпечує поліпшення енергоефективності вузлів телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності;
- Функціонально-структурна модель інтеграції повітряних безпілотних платформ в аерокосмічній мережі, яка дозволяє приймати рішення про ефективне розташування вузлів аерокосмічної мережі з урахуванням параметрів каналу та мінімальних витрат енергії для зміни місцезнаходження повітряних безпілотних платформ.

Практичне використання зазначених результатів дає змогу підвищити енергоефективність мережі, покращити якість обслуговування користувачів, забезпечити більш обґрунтоване прийняття рішень щодо розміщення ретрансляційних вузлів та оцінки параметрів телекомунікаційного каналу в умовах невизначеності.

Директор



Богдан ДОНЧУК

# Товариство з обмеженою відповідальністю "НАЦІОНАЛЬНИЙ РЕФЕРЕНТ ЦЕНТР"

10003, Житомирська обл. м. Житомир, вул. Ольжича, буд. 9,  
ЄДРПОУ 39720582, п/р UA92 305299 00000 26003015017732 в ПАТ КБ «Приватбанк»,  
тел. (093) 225-60-73

## А К Т

Цим актом затверджує, що результати дисертаційного дослідження здобувача кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій **ЯКОВЦЯ Всеволода Петровича** на тему «Метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж за допомогою повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності» за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка» впроваджено в діяльність ТОВ «НАЦІОНАЛЬНИЙ РЕФЕРЕНТ ЦЕНТР».

У ході виконання дисертаційної роботи аспірантом Яковцем В.П. розроблено метод підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж із застосуванням повітряних безпілотних платформ в умовах невизначеності, а також удосконалено математичні та імітаційні моделі, що забезпечують оцінювання параметрів каналу зв'язку, визначення оптимального розташування ретрансляційних вузлів та підвищення енергоефективності телекомунікаційної мережі.

Зокрема, впроваджено:

- удосконалену математичну модель каналу обміну інформацією між базовою станцією та користувачем із урахуванням завмирання сигналу;
- метод визначення оптимального місцезнаходження ретрансляційного вузла з урахуванням енергоефективності.
- метод підвищення якості функціонування телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності.

Використання зазначених результатів дає змогу підвищити ефективність функціонування телекомунікаційних мереж, покращити якість обслуговування користувачів, зменшити енергоспоживання мережевих вузлів, а також забезпечити обґрунтоване прийняття рішень щодо розміщення ретрансляційних вузлів і параметрів їхньої взаємодії з наземною інфраструктурою.

Директор



Андрій ТРЕМБОВЕЦЬКИЙ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Державного  
університету інформаційно-  
комунікаційних технологій  
член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор,  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки,  
Заслужений діяч науки і техніки України

Олександр КОРЧЕНКО

" 24 "

2026 р.

## АКТ

**впровадження результатів наукових досліджень  
Яковця Всеволода Петровича  
у наукову та науково-технічну діяльність  
Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій**

Комісія у складі:

голови комісії – завідувача кафедри Робототехніки та технічних систем  
навчально-наукового інституту телекомунікацій, доктора технічних наук,  
професора Мельника Ю.В.;

членів комісії:

директора інституту Телекомунікацій Державного університету  
інформаційно-комунікаційних технологій, кандидата технічних наук, доцента  
Кравченка В.І.

професора кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій  
навчально-наукового інституту телекомунікацій, доктора технічних наук,  
професора Беркман Л.Н.;

завідувача кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій  
навчально-наукового інституту телекомунікацій, кандидата технічних наук,  
доцента Галаган Н.В.;

в період з 20 по 23 квітня 2026 року розглянула надані матеріали та  
встановила, що нові наукові положення, які розроблені особисто аспірантом  
Яковцем В.П. в межах дисертаційного дослідження, а саме:

- математична модель каналу обміну інформацією між базовою станцією і  
користувачем в умовах невизначеності, яка відрізняється від існуючих тим, що  
окрім основної завади (білий шум) враховує завмирання сигналу.

- метод визначення оптимального місцезнаходження БПЛА-БС для обслуговування наземних користувачів, який на відміну від існуючих, забезпечує поліпшення енергоефективності вузлів телекомунікаційної мережі в умовах невизначеності.

були використані під час проведення досліджень та підготовки матеріалів науково-дослідної роботи, що виконувалась у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій за темою «Функціонування комунікаційних мереж в умовах надзвичайного стану» (договір з ТОВ «ТриМоб» № 2-217 від 11.10.2024 р.),

та науково-дослідної роботи, що виконувалась у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій за темою «Методи та засоби оптимізації параметрів та ресурсів електронних комунікаційних мереж ІКС із застосуванням ІШ» (договір з ТОВ «ТриМоб» № 11/25 від 03.12 2025 р.),

а також використовуються в навчальному процесі навчально-наукового інституту телекомунікацій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при викладанні кваліфікаційних освітньої дисципліни «Безпроводові телекомунікаційні мережі».

Голова комісії:

доктор технічних наук, професор



Юрій МЕЛЬНИК

Члени комісії:

кандидат технічних наук, доцент



Владислав КРАВЧЕНКО

доктор технічних наук, професор



Любов БЕРКМАН

кандидат технічних наук, доцент



Наталія ГАЛАГАН