

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-44>

УДК: 621.396.9:629.73

Радзівілов Григорій Данилович¹, к. т. н., професор, заступник начальника

<https://orcid.org/0000-0002-6047-1897>

Дегтяр Олег Андрійович¹, д. н. з держ. упр., професор, провідний науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-6413-3580>

Безносенко Сергій Юрійович², начальник науково-дослідного відділу (технічного забезпечення засобів зв'язку та автоматизації) науково-дослідного управління (розвитку військ зв'язку)

<https://orcid.org/0000-0002-1045-1492>

Ткаченко Андрій Леонідович², начальник науково-дослідного управління (розвитку військ зв'язку)

<https://orcid.org/0000-0002-9789-8536>

¹ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

² Науковий центр зв'язку та інформатизації Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

СУЧАСНІ МОЖЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Радзівілов Г.Д., Дегтяр О.А., Безносенко С.Ю., Ткаченко А.Л. Сучасні можливості управління мобільними телекомунікаційними мережами з використанням безпілотних літальних апаратів. В роботі розглядаються сценарії ретрансляційного зв'язку з використанням безпілотних літальних апаратів в якості одного з методів телекомунікації, де автором було з'ясовано, що сучасні методи управління мобільними телекомунікаційними мережами потребують залучення безпілотних літальних апаратів з метою покращення з'єднання та передачі інформації на великі відстані. Метою даного дослідження є вивчення сучасних можливостей мобільних телекомунікаційних мереж на основі ретрансляційного з'єднання з безпілотними літальними апаратами для проведення аналізу використання в чотирьох сценаріях БПЛА-ретрансляції. В роботі досліджуються можливості та перспективи використання безпілотних літальних апаратів для ретрансляції сигналів в телекомунікаційних мережах, де було обґрунтовано переваги використання безпілотних літальних апаратів для створення тимчасових ретрансляційних вузлів у випадках аварійних ситуацій, природних катастроф тощо. Описано деякі питання стабільності сигналу та покриття, а також проаналізовано можливості інтеграції БПЛА-ретрансляторів в існуючу інфраструктуру мобільних мереж з врахуванням вимог до пропускної здатності та мінімізації затримок передачі даних. Згідно з потребами зв'язку автором було охарактеризовано та класифіковано чотири різні сценарії застосування ретрансляції зв'язку в поєднанні з безпілотними літальними апаратами. Окрім того, в статті також зазначаються питання та проблеми ретрансляційного зв'язку з безпілотними літальними апаратами в порівнянні з традиційним ретрансляційним зв'язком. На основі проведеного аналізу застосування сценаріїв ретрансляції БПЛА в статті зазначено, що одним з суттєвих недоліків є оптимізація траєкторії безпілотних літальних апаратів, що може впливати на якість отримання інформації завдяки телекомунікації.

Ключові слова: мобільна телекомунікаційна мережа, ретрансляційне з'єднання, мережі ретрансляції, безпілотний літальний апарат, оптимізація траєкторії, сценарії ретрансляції.

Radzivilov H., Diegtiar O., Beznosenko S., Tkachenko A. Modern possibilities of managing mobile telecommunication networks using unmanned aerial vehicles. The paper considers the scenarios of retransmission communication using unmanned aerial vehicles as one of the methods of telecommunication, where the author found that modern methods of managing mobile telecommunication networks require the involvement of unmanned aerial vehicles in order to improve the connection and transmission of information over long distances. The purpose of this study is to investigate the current capabilities of mobile telecommunication networks based on retransmission connections with unmanned aerial vehicles to analyse the use of UAVs in four retransmission scenarios. The paper explores the possibilities and prospects of using unmanned aerial vehicles for signal retransmission in telecommunications networks, where the advantages of using unmanned aerial vehicles to create temporary retransmission nodes in case of emergencies, natural disasters, etc. are substantiated. Some issues of signal stability and coverage are described, and the possibilities of integrating UAV repeaters into the existing infrastructure of mobile networks are analysed, taking into account the requirements for bandwidth and minimising data transmission delays. According to the communication needs, the author characterised and classified four different scenarios of using retransmission communication in combination with unmanned aerial vehicles. In addition, the article also identifies the issues and challenges of retransmission communications with unmanned aerial vehicles in comparison with traditional retransmission communications. Based on the analysis of the application of UAV retransmission scenarios, the article notes that one of the significant drawbacks is the optimisation of the UAV trajectory, which may affect the quality of information received through telecommunications.

Keywords: mobile telecommunication network, retransmission connection, retransmission networks, unmanned aerial vehicle, trajectory optimisation, retransmission scenarios.

Актуальність. З розвитком сучасних технологій телекомунікаційна галузь стикається з новими викликами та можливостями, де водночас з цим мобільні телекомунікації відіграють важливу роль у житті людей. Вони використовуються для спілкування, доступу до інформації, розваг та ведення бізнесу. Роль мобільних телекомунікаційних мереж (МТМ) пов'язана з впровадженням нових технологій, таких як використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що відкриває нові горизонти для управління та оптимізації МТМ. Однак попит на мобільні послуги постійно зростає, що призводить до необхідності розширення та покращення МТМ [1].

Постановка наукової проблеми. В сучасному світі МТМ відіграють важливу роль в забезпеченні зв'язку та доступу до інформаційних ресурсів як для бізнесу, так і для населення в цілому. Одночасно з цим існує низка проблем, які можуть впливати на ускладнення ефективності управління та розгортання таких мереж, особливо у віддалених та важкодоступних регіонах. Традиційні методи розгортання телекомунікаційної інфраструктури є часто дорогими, трудомісткими, які потребують значних ресурсів та часу. Крім того, забезпечення стабільного покриття та високої якості обслуговування в умовах змінного навантаження та природних катаклізмів залишається досі невирішеним питанням, яке може містити значні наслідки [2, 3].

Одним з перспективних та ефективних рішень цих проблем є використання БПЛА для управління МТМ, так як літальні апарати забезпечують швидке та гнучке розгортання мереж, особливо в екстрених та непередбачених ситуаціях, наприклад, стихійні лиха або техногенні аварії. Вони також дозволяють оптимізувати використання ресурсів та знизити витрати на встановлення, обслуговування та ремонт традиційних базових станцій [1, 3].

Однак, незважаючи на значний потенціал, використання літальних апаратів для управління МТМ може містити перелік технічних та організаційних проблем, де необхідно розробити ефективні методи управління та координації літальних апаратів, забезпечити надійну передачу даних та інтеграцію з існуючою телекомунікаційною інфраструктурою. Крім того, важливо врахувати питання безпеки та врегулювання використання літальних апаратів, що є також не менш важливим для успішної реалізації [4].

Таким чином, постає необхідність проведення досліджень, спрямованих на розробку та впровадження ефективних методів управління МТМ з використанням БПЛА. Це в свою чергу дозволить підвищити ефективність та надійність мобільних мереж, забезпечить їх швидке розгортання та гнучкість, що є актуальним питанням в контексті сучасних викликів та потреб телекомунікаційної галузі.

Аналіз досліджень. За останні роки використання БПЛА значно зросло, що обумовлюється швидким прогресом у напрямку впровадження, розробки, виробництва недорогих та надійних БПЛА зі зростаючими потребами використання таких платформ в цивільних цілях [1, 3]. Завдяки ключовим можливостям, таким як висока мобільність, швидке розгортання та гнучкість БПЛА мають неабиякий потенціал для використання в багатьох додатках бездротових систем.

Як зазначено в роботі [5] з одного боку, БПЛА можуть функціонувати як літаючі мобільні термінали в бездротових та стільникових мережах з метою забезпечення виконання різноманітних задач, наприклад, доставка товарів, пошук та порятунок, дистанційне зондування тощо. З іншого боку, БПЛА можуть використовуватися в якості повітряних базових станцій для збільшення або розширення покриття бездротового зв'язку, надійності та пропускної здатності бездротових систем без додаткових інвестицій в інфраструктуру бездротових систем. На основі проведеного огляду авторами досліджувалося питання щодо використання мереж БПЛА згідно з цивільними потребами за допомогою додатків на основі МТМ, де також розглядалися комунікаційні вимоги цих додатків.

Однак, щоб задовольнити швидке зростання попиту на різноманітний трафік у мережах мобільного зв'язку пропонуються нові рішення щодо використання БПЛА для підтримки наземних мереж шляхом перенесення базових станцій на потреби в разі необхідності [4, 5]. Але питання ефективного та результативного розгортання БПЛА є доволі складним завданням. Авторами в роботі [6] розглядалися питання з балансуванням навантаження, де автори намагалися зробити навантаження на трафік БПЛА майже рівномірним з метою забезпечення МТМ до стабільності та стійкості при виникненні непередбачених ситуацій. Для досягнення цієї мети авторами проводилася попередня обробка в поєднанні з методом кластеризації з метою розподілення користувачів на декілька категорій для ініціалізації положення БПЛА в зонах максимальної локальної щільності, що

дозволило мінімізувати максимальний попит на трафік в субрегіонах з обмеженою пропускною здатністю.

Останніми досягненнями з точки зору інформаційних технологій та телекомунікаційних мереж є використання БПЛА з підключенням до інтернету за допомогою телекомунікацій 4G та 5G [7, 8]. Бездротові мережі зв'язку наступного покоління 5G та 6G можуть відкрити безліч можливостей для існуючої телекомунікаційної галузі, де ключовими перевагами будуть вища пропускна здатність й низька затримка. Тому в даному контексті використання БПЛА може стати можливим варіантом для розгортання послуг 5G та 6G. В роботі [8] автори акцентували увагу на останніх розробках та проблемах, які можуть виникати в поєднанні технологій БПЛА з 5G, де основні зусилля були зосереджені на архітектурі ретрансляції БПЛА, визначенню відповідних проблем та обмежень в розгортанні БПЛА в каналах доступу та каналах зворотного зв'язку.

Можливість розгортання БПЛА в якості бездротових ретрансляторів або повітряних базових станцій сприяє покращенню підключенню та покриттю в стільникових мережах. Також БПЛА можна використовувати для значного підвищення продуктивності мобільних однорангових мереж та бездротових мереж. Очікується, що в майбутньому БПЛА стануть невід'ємною частиною бездротових мереж 5G та ключовими факторами масового Інтернету речей. Однак для розробки архітектури та розгортання мереж на основі БПЛА все ще існує багато складних проблем. З цією метою в роботі [9] авторами розглядалася можливість застосування теорії ігор в якості ефективного інструменту для моделювання та аналізу проблем у мережах, що дозволило виявити різноманітні проблеми мереж, які працюють за допомогою БПЛА. Автори мали на меті надати інформацію щодо розуміння телекомунікаційних мереж з підтримкою БПЛА з точки зору їх архітектури, переваг, недоліків, проблем та різноманітних теоретичних рішень, застосованих до цих комунікаційних мереж.

Переваги використання БПЛА для управління телекомунікаційними мережами пов'язані зі швидким та ефективним розгортанням з метою підтримки стільникових мереж, а також підвищення їхньої якості обслуговування шляхом встановлення ліній зв'язку в межах прямої видимості. Для того, щоб з'ясувати основні фундаментальні аспекти використання БПЛА в процесах управління МТМ в роботі [10] авторами розроблена наступна структура: 1) ефективне розгортання БПЛА; 2) оцінка та оптимізація продуктивності; 3) розробка нових літаючих тривимірних бездротових систем. Для розгортання, використовуючи інструменти теорії оптимізації авторами розроблені цілісні структури для оптимального 3D-розміщення базових станцій БПЛА у висхідних та низхідних сценаріях, що дозволяє значно покращити покриття низхідної лінії зв'язку для наземних користувачів і забезпечує наднадійний та енергоефективний висхідний зв'язок у додатках Інтернету речей.

До невирішених питань загальної проблеми даного дослідження можна віднести декілька важливих факторів, а саме: трудомісткість розгортання телекомунікаційної інфраструктури, проблеми забезпечення стабільного покриття, необхідність розробки ефективних методів управління та координації літальних апаратів, забезпечення надійної передачі даних та інтеграції з існуючою телекомунікаційною інфраструктурою. Тому для вирішення раніше невирішених питань в даному дослідженні розглядалися чотири різні сценарії ретрансляції БПЛА, що впливає на вищезазначені фактори.

Метою роботи. Метою даного дослідження є вивчення сучасних можливостей мобільних телекомунікаційних мереж на основі ретрансляційного з'єднання з безпілотними літальними апаратами для проведення аналізу використання в чотирьох сценаріях ретрансляції БПЛА. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: на основі літературного огляду проаналізувати можливості телекомунікаційних мереж в поєднанні з використанням безпілотних літальних апаратів; дослідити можливість використання ретрансляторів в якості телекомунікаційної мережі; побудувати основні сценарії використання ретрансляторів БПЛА за різних умов; проаналізувати основні переваги та недоліки для кожного з охарактеризованих сценаріїв ретрансляції БПЛА.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Зі стрімким розвитком бездротового зв'язку, а також швидким зростанням масштабу та різноманітності послуг мобільного зв'язку кількість даних, які підлягають обробці, передачі та

зберіганню постійно зростає. Одночасно з цим мобільні передачі даних з високою ємністю, високою швидкістю та високим покриттям стали центром уваги в галузі, яка є актуальною проблемою з точки зору телекомунікацій. Існуюча система бездротового зв'язку все частіше стикається з новими викликами та проблемами в телекомунікаційній мережі, що вказує на необхідність пошуку нових рішень, де одним з таких рішень є застосування зв'язку за допомогою БПЛА.

На відміну від традиційного наземного стільникового зв'язку та мереж супутникового зв'язку основні переваги мереж зв'язку за допомогою БПЛА є наступними: 1) завдяки низькій вартості та можливості швидкого розгортання БПЛА вони підходять для вирішення надзвичайних ситуацій, а також для завдань з обмеженою тривалістю, наприклад, екстрене відновлення зв'язку, коли інфраструктура зв'язку може бути сильно пошкодженою, наприклад, через непередбачені ситуації стихійного лиха, або розвантаження даних, коли базові станції стільникового зв'язку перевантажені тощо. Тому за допомогою БПЛА, оснащених засобами зв'язку можна швидко встановити зв'язок, а також забезпечити покриття зі зв'язком для областей, де не вистачає комунікаційної інфраструктури, наприклад, для інспекцій гірських електростанцій, або для інспекцій на кордоні та надання допомоги при стихійних лихах тощо.

У порівнянні з наземним зв'язком, зв'язок БПЛА має деякі переваги з наявністю кращих сигналів зв'язку та меншої чутливості до наземних будівель. Через висоту базової станції на традиційний бездротовий зв'язок можуть легко впливати перешкоди, як високі гори та високі будівлі, де відповідно якістю зв'язку буде значно погіршена. Тому на основі того, що БПЛА мають перевагу в повітрі вони можуть з легкістю уникати перешкоди та встановлювати надійні лінії зв'язку.

Таким чином, з такими перевагами, як швидке реагування, висока маневреність, низька вартість, гнучке розгортання, хороший канал і висока керованість, бездротовий зв'язок за допомогою БПЛА має широке застосування в безпеці національної оборони, реагуванні на надзвичайні ситуації та ліквідації наслідків катастроф. Це має практичне значення для повного вивчення характеристик БПЛА в бездротовому зв'язку за допомогою БПЛА та покращення якості зв'язку, рівня доступності та енергоефективності шляхом оптимізації траєкторії БПЛА, розподілу ресурсів і схем передачі.

У літературі зв'язок за допомогою БПЛА має три типових сценарії, а саме: ретрансляція за допомогою БПЛА, повсюдне покриття за допомогою БПЛА, а також поширення інформації та збір даних за допомогою БПЛА. Зокрема, очікується, що використання БПЛА як повітряних ретрансляторів стане перспективним рішенням для покращення продуктивності існуючого бездротового зв'язку. У порівнянні з традиційним зв'язком з одним стрибком, технологія ретрансляції може значно покращити покриття мережі, ефективно придушити втрату бездротових каналів для доставки інформації та підвищити надійність бездротового зв'язку.

Телекомунікаційна мережа та телекомунікаційний зв'язок. Телекомунікаційна мережа є системою, яка дозволяє передавати дані та інформацію між різними точками через різні канали зв'язку. Такі мережі можуть використовувати різні типи передавальних середовищ, такі як кабелі (оптоволоконні, мідні), радіохвилі (бездротовий зв'язок) та супутники [11]. Телекомунікаційні мережі здатні забезпечувати передачу інформації між різними користувачами через спеціальні канали зв'язку, які складаються з різних компонентів [11-12]:

- передавачі та приймачі, де пристрої здійснюють кодування та передачу сигналів (наприклад, модеми або маршрутизатори) з наступним отриманням та декодуванням;

- канали зв'язку, де можуть бути фізичні або бездротові середовища, через які передаються сигнали;

- комутаційне обладнання, де пристрої, які управляють потоками даних направляють їх до відповідних адресатів (в якості комутаційного обладнання можуть слугувати комутатори, маршрутизатори та концентратори);

- протоколи зв'язку, що складається з набору правил та стандартів, які забезпечують процес передачі даних для коректності та безпеки, де прикладами можуть бути TCP/IP для інтернету та LTE для мобільного зв'язку;

- центральні вузли, де великі комутаційні центри або дата-центри координують та обробляють значний обсяг трафіку, забезпечуючи його розподіл та зберігання.

Телекомунікаційні мережі класифікують за деякими критеріями як за типом переданої інформації, так і за радіусом дії. За типом переданої інформації можуть бути голосові та мультимедійні дані. За радіусом дії телекомунікаційні мережі поділяються на: локальні мережі (LAN), які забезпечують зв'язок в межах обмеженої території, наприклад, всередині будівлі; регіональні або міські мережі (MAN), які з'єднують декілька локальних мереж в межах міста або агломерації; глобальні мережі (WAN), які покривають великі географічні відстані, об'єднуючи міські та локальні мережі, наприклад, інтернет. До основних компонентів МТМ відносяться базові станції, контролери базових станцій, мобільні комутатори та системи підтримки операцій [12].

Ретрансляційне з'єднання. Ретрансляційний зв'язок (ретрансляція) є методом передачі сигналів у телекомунікаційних мережах, при якому сигнал передається від одного передавача до іншого через проміжні вузли або ретранслятори, що забезпечує передачу сигналів на великі відстані або в умовах, де прямий зв'язок між кінцевими точками неможливий або ускладнений [13]. На рис. 1 показано ретранслятор телекомунікаційної мережі.



Рис. 1. Ретранслятори телекомунікаційної мережі, базова приймально-передавальна станція, яка містить баштовий передавач та ретранслятор антени бездротового зв'язку
Джерело: сформовано авторами

Розглянемо основні аспекти ретрансляційного зв'язку, який може використовуватися в поєднанні з БПЛА [14, 15].

1) Ретранслятори – пристрої, які приймають сигнал, підсилюють його та передають далі, де пристрої можуть бути встановлені на землі (на вежі або будівлі) або в космосі (супутники). У мобільних мережах ретранслятори використовуються для покращення покриття в міських зонах, у віддалених районах або в місцях з перешкодами (наприклад, гірські райони).

2) Принцип дії ретрансляторів обумовлений прийманням сигналу від джерела або іншого ретранслятора з підсиленням його та передачею наступному ретранслятору або кінцевому приймачу. Цей процес може повторюватися декілька разів, що дозволяє сигналу подолати великі відстані або складні умови.

3) Типи ретрансляційного зв'язку можуть поділятися на:

- наземна ретрансляція, яка використовує наземні станції (вежі, будівлі) для передачі сигналів;
- супутникова ретрансляція, яка використовує супутники на орбіті для прийому і передачі сигналів, що дозволяє забезпечити глобальне покриття та зв'язок у віддалених районах;
- радіорелейний зв'язок, який використовує мікрохвильові радіохвилі для передачі сигналів між наземними станціями на великі відстані.

4) Переваги ретрансляційного зв'язку, що охоплює наступне:

- збільшення (розширення) покриття, що дозволяє забезпечити зв'язок у віддалених або важкодоступних місцях;

- підсилення сигналу, що підвищує якість сигналу, знижуючи втрати при передачі на великі відстані;
 - гнучкість, яка може використовуватися при різних умовах і для різних видів зв'язку (голосовий зв'язок, передача даних, телевізійне мовлення тощо).
- 5) Недоліки ретрансляційного зв'язку обумовлені наступним:
- затримки, які можливі в передачі сигналу через проходження через кілька ретрансляторів;
 - складність, де встановлення та обслуговування ретрансляторів може бути складним і дорогим;
 - вразливість, де ретранслятори можуть бути вразливими до технічних збоїв або навмисних пошкоджень тощо.

Тому ретрансляційний зв'язок є важливим елементом телекомунікаційних систем та МТМ, що забезпечує надійний та ефективний зв'язок на великі відстані, а також за умов складного рельєфу.

Ретрансляційне з'єднання з використанням БПЛА. Після того, як вище було зазначено про телекомунікаційні мережі та ретрансляційне з'єднання далі розглянемо чотири сценарії застосування ретрансляційного з'єднання в поєднанні з БПЛА [14]. Дальність зв'язку БПЛА обумовлена їх функціональними можливостями та характеристиками, де можуть використовуватися як 2,4 ГГц для управління БПЛА, так і 5 ГГц для передачі відео з дальністю зв'язку, який може досягати близько 5-6 км. Проте, ці параметри можуть бути значно кращими, де частота може сягати близько 800-900 МГц для управління БПЛА та 1,3-1,4 ГГц для передачі відео в діапазоні 25-30 км. Розглянемо ситуацію для чотирьох сценаріїв, де відстань між джерелом і пунктом призначення складає 5 км, а один БПЛА може використовуватися в якості проміжного ретранслятора, як показано на рис. 2 (а). Коли ця відстань може бути більшою ніж 5 км, то в такому випадку доцільно використовувати декілька БПЛА в якості проміжних ретрансляторів для обміну інформацією, як показано на рис. 2 (б).

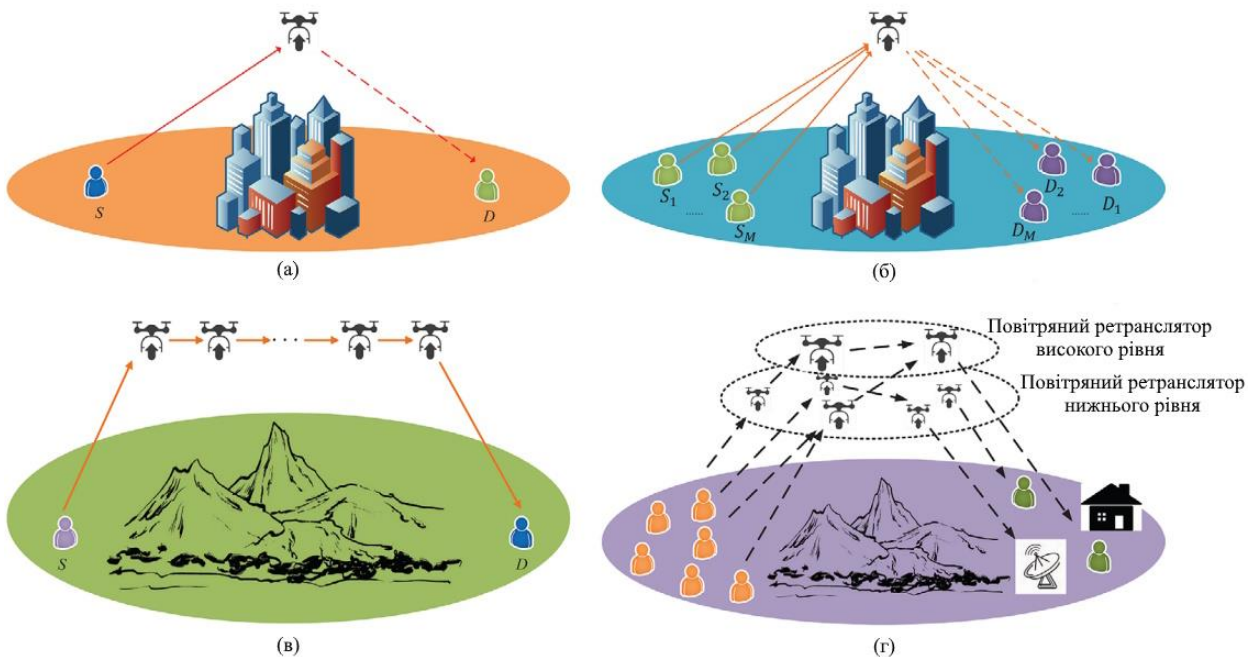


Рис. 2. Сценарії ретрансляції зв'язку з використанням БПЛА, де (а) окремі мережі ретрансляції БПЛА; (б) багатокористувацькі мережі ретрансляції БПЛА; (в) багатогодові мережі ретрансляції БПЛА; (г) Інтернет БПЛА

Джерело: сформовано авторами на основі [15]

Сценарій 1. Мережі ретрансляції одиночних БПЛА. На рис. 2 (а) показано бездротову систему з парою джерело-приймач S і D, де обидва розташовані на земній поверхні й між ними прямий зв'язок відсутній, що обумовлюється деякими умовами, наприклад, надмірна відстань або серйозні перешкоди зв'язку між парою джерело-приймач. Тому в даному випадку БПЛА може

використовуватися в якості ретрансляційного вузла для обміну інформацією між S та D. Даний сценарій є найпростішим, так як лише пара вузлів джерела та вузла призначення повинні передавати та обмінюватися інформацією, а наявність однієї одиниці БПЛА може бути достатньо для ефективної передачі інформації. Однак, з точки зору практичності можуть виникнути певні складнощі, які обумовлені наступним:

- 1) незалежно від того, чи є пара джерело-приймач на земній поверхні стаціонарною чи мобільною, на місці події можуть виникати різні труднощі;
- 2) пара джерело-отримувач може мати декілька джерел, яким необхідно обмінюватися інформацією, що призводить до двосторонньої схеми ретрансляції;
- 3) режим ретрансляції, такий як підсилення та передача, або декодування та передача також можуть провокувати різні проблеми для оптимізації ретрансляції.
- 4) для ретрансляції БПЛА необхідно вибрати найбільш зручне та фіксоване місце, або оптимальну траєкторію польоту БПЛА для здійснення ретрансляції.

Згідно з першим сценарієм проблема оптимізації траєкторії БПЛА є найбільш критичною, де використовуються статичні та мобільні реле БПЛА. Дослідження статичних реле БПЛА зосереджені на підвищенні продуктивності бездротових мереж за допомогою оптимізації розгортання БПЛА. Дослідження мобільних ретрансляторів БПЛА забезпечує створення різноманітних схем планування БПЛА, де можуть розроблятися схеми мобільної ретрансляції для режимів підсилення-передача, або декодування-передача, що призначено для альтернативного доступу до вузла джерела та вузла призначення, де БПЛА може летіти по прямій лінії й кожен цикл польоту може бути розділений на дві фази, як показано на рис. 3.

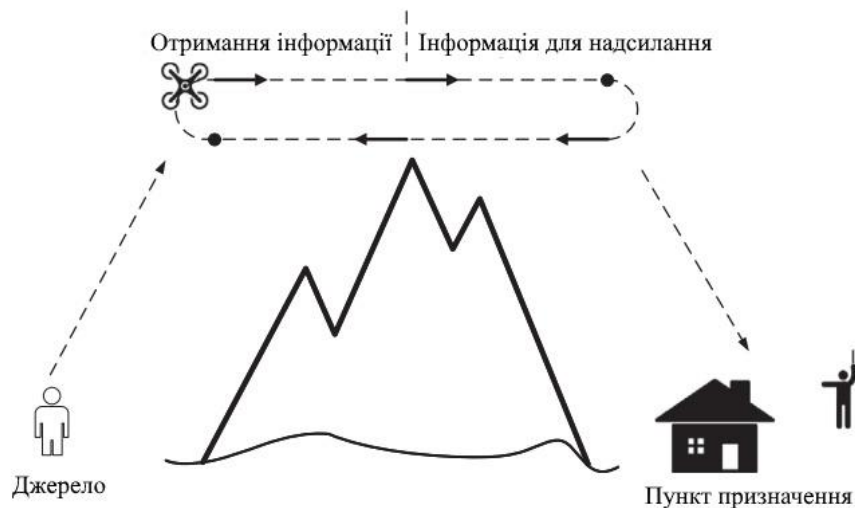


Рис. 3. Проектування траєкторії ретрансляції БПЛА режимів підсилення-передача, декодування-передача.

Джерело: сформовано авторами на основі [15]

Далі розглянемо декілька етапів сценарію. Перший етап відповідає за отримання, обробку та збереження інформації, де БПЛА повинен максимально швидко переміщуватися до вихідного вузла, а потім повертатися. У випадку, якщо швидкість та тривалість польоту БПЛА будуть мати достатньо великі значення, БПЛА протягом певного часу може затриматися над вихідним вузлом, перш ніж повернутися, щоб скористатися найкращим каналом зв'язку, де може отримувати інформацію та зберігати її в буфері даних без перешкод.

Другий етап відповідає за відправку інформації, де БПЛА повинен якнайшвидше переміщуватися до вузла призначення, а потім повернутися. На даному етапі БПЛА також може затриматися на певний час, якщо швидкість та тривалість польоту будуть мати достатньо великі значення, де здійснюється відправка інформації з буферу даних до вузла призначення без перешкод. Однак у схемі мобільної ретрансляції може бути затримка передачі інформації, яка може зростати зі збільшенням тривалості польоту БПЛА.

Сценарій 2. Багатокористувацькі мережі ретрансляції БПЛА. Згідно з рис. 2 (б), якщо один БПЛА використовується для передачі інформації для кількох пар користувачів, розташованих на земній поверхні, позначених як $S_1, S_2 \dots S_m$ та $D_1, D_2 \dots D_m$ вважається, що всі пари користувачів неспроможні до прямого зв'язку й можуть бути встановлені зв'язком за допомогою реле БПЛА. На відміну від попереднього сценарію багатокористувацькі мережі ретрансляції БПЛА вимагають додаткового розгляду протоколів множинного доступу, так як БПЛА потрібно обслуговувати кілька пар джерело-приймач у мережі.

Для багатокористувацьких пар ретрансляційних зв'язків у сценарії 2 найбільш складними проблемами є ефективне проектування протоколу планування множинного доступу та розподіл потужності, коли БПЛА обслуговує декілька користувачів одночасно. Так як в багатокористувацьких мережах ретрансляції БПЛА декілька пар користувачів передають інформацію через загальний БПЛА, вони в свою чергу можуть створювати перешкоди один одному, де необхідно призначити різний ортогональний спектр або часові діапазони для кожної пари користувачів, з метою уникнення перешкод та їх розрізнення. Одночасно з цим ефективне керування живленням для різних користувачів може повною мірою використовувати ресурси живлення та покращити продуктивність передачі багатокористувацької мережі.

Однак через різні стани каналів кожної пари користувачів під час польоту БПЛА не може передавати інформацію в реальному часі, тому можливість буферизації є доволі важливим питанням. Зокрема, протягом усього польоту БПЛА безперервно приймає та декодує інформацію від вихідних вузлів S_1, S_2 зі збереженням в буфері даних, який потім доставляється до відповідних вузлів призначення D_1, D_2 у відповідний час.

Традиційні релейні системи можуть передавати та приймати інформацію в різний час в ортогональних частотних діапазонах, тоді як релейні системи можуть передавати і отримувати інформацію одночасно на одній частоті. Тому порівняно з ретранслятором, реле може значно покращувати спектральну ефективність системи бездротового зв'язку та забезпечує більшу гнучкість для проектування мережі ретрансляції.

Сценарій 3. Багатоходові мережі ретрансляції БПЛА. Згідно з рис. 2 (в) декілька БПЛА можуть використовуватися в якості ретрансляційних вузлів для підтримки зв'язку між парою джерело-приймач S та D , які розташовані на земній поверхні, але прямий зв'язок між ними відсутній. Вся пара джерело-приймач і ретранслятори БПЛА можуть обмінюватися інформацією тільки з лівим та правим найближчими сусідніми вузлами.

Декілька БПЛА потрібні для забезпечення зв'язку, оскільки один БПЛА може не впоратися з ретрансляцією, оскільки вони знаходяться занадто далеко один від одного або середовище надто складне. Ретрансляція за допомогою декількох БПЛА принесе деякі нові проблеми.

1) Перш за все, необхідно знайти відповідну кількість ретрансляторів БПЛА, щоб два сусідні ретранслятори не були занадто далеко один від одного, щоб впливати на якість зв'язку між ними, і не були занадто близько один до одного, щоб створювати надмірні взаємні перешкоди. Це визначається різними факторами, включаючи специфіку місцевості, відстань між і, комунікаційні можливості БПЛА тощо.

2) По-друге, існує проблема спільної оптимізації позицій або траєкторій декількох БПЛА.

3) Багатоходова ретрансляція БПЛА вимагає відповідного дизайну протоколу багатоходової ретрансляції, що призводить до більш складного спільного планування роботи декількох БПЛА. Зокрема, розробка протоколу багатоходової ретрансляції пов'язана з напрямком передачі інформації та режимом ретрансляції.

З метою покращення продуктивності багаточислового зв'язку БПЛА, неминуче потрібно виконати спільну оптимізацію траєкторії декількох БПЛА, щоб повною мірою використати мобільність БПЛА і розробити відповідні протоколи багаточислового зв'язку.

Для односторонньої передачі інформації схема багаточислової ретрансляції БПЛА може бути розроблена так, як показано на рис. 2 (в). Траєкторія БПЛА обмежується лише початковим і кінцевим розташуванням і спільно оптимізується відповідно до мети зв'язку. Застосовується стратегія декодування-передача з рівною пропускну здатністю для прийому і передачі інформації. Інформація передається від вузла-джерела до вузла призначення послідовно за допомогою декількох

стрибків. Тому затримка пересилання, спричинена передачею інформації через БПЛА становить часові інтервали.

Сценарій 4. Інтернет БПЛА. З розширенням застосування БПЛА виконання завдань покриття зв'язку невеликою кількістю БПЛА може більше не відповідати складним та мінливим фактичним потребам у зв'язку. Для спільного ефективного виконання таких завдань за допомогою БПЛА реалізується мультиплатформний та багатоцільовий зв'язок, який може використовувати Інтернет в поєднанні з БПЛА в якості доповнення до ретрансляційного зв'язку БПЛА. На рис. 2 (г) показано масштабний сценарій ретрансляції, де група БПЛА формує ретрансляційну мережу для надання послуг зв'язку для двосторонніх багатокористувацьких мереж. У цьому сценарії група БПЛА об'єднана в мережу для широкомасштабного ретрансляційного зв'язку, утворюючи багатоплосковий ретрансляційний площину і забезпечуючи гнучкі і надійні з'єднання.

У цьому сценарії зв'язок між наземними користувачами і БПЛА - це не просто зв'язок «точка-точка», а зв'язок «один-до-багатьох» або навіть «багато-до-багатьох», який може змінюватися з часом. Таким чином, традиційний односторонній або двосторонній ретрансляційний зв'язок між БПЛА може більше не відповідати вимогам сервісу, що призведе до появи нової архітектури, яку називають Інтернетом БПЛА. Для різних умов зв'язку можна розробити різні схеми розгортання Інтернету БПЛА або більш складні мережеві рішення для мобільних БПЛА, які змінюються відповідно до вимог. Розташування ретрансляційних вузлів безпосередньо впливає на якість покриття і зв'язність мережі, а отже, визначає топологію і надійність всієї мережі. Крім того, важливими питаннями є спільна комунікація і оптимізація маршрутизації декількох БПЛА.

У порівнянні з ретрансляційним зв'язком «точка-точка», Інтернет БПЛА має більш жорсткі вимоги до надійності і навантаження на систему ретрансляційного зв'язку БПЛА. У багатокористувацькій зоні розподілу розумне і ефективно розгортання мережі з декількома БПЛА, де механізм оптимізації маршрутизації є важливими засобами для забезпечення ретрансляційного зв'язку для складного Інтернету БПЛА.

Перш за все, необхідно розробити схему безперервного розгортання БПЛА з низьким рівнем складності для ефективного покращення покриття мережі та пропускної здатності ретрансляційної мережі. Масштабний сценарій ретрансляційного зв'язку показаний на рисунку 2 (г). Для досягнення надійного і стабільного ретрансляційного зв'язку ключова технологія полягає в розумному і ефективному позиційному розгортанні БПЛА. Завдяки розгортанню вторинної високорівневої ретрансляційної площини БПЛА на низькорівневій ретрансляційній площині БПЛА, вона забезпечує високу пропускну здатність, багатоканальні паралельні шляхи для ретрансляційного зв'язку, тим самим покращуючи пропускну здатність мережі і надійність ретрансляційної системи.

Крім того, коли мережа ретрансляційного зв'язку БПЛА передає великий обсяг даних у реальному сценарії великомасштабного ретрансляційного зв'язку, може існувати кілька можливих шляхів передачі даних, і одночасна передача даних може проходити через деякі ключові вузли ретрансляції одночасно. Тому неминуче виникають проблеми вибору шляху передачі даних та уникнення колізій даних. Для типових сценаріїв, таких як багатоходовою передача і розподіл даних в повітряній мережі ретрансляторів БПЛА, необхідна оптимізація схем маршрутизації для багатошляхових даних і механізмів уникнення завад в Інтернеті БПЛА. Ці технології можуть спільно оптимізувати маршрутизацію і планування ресурсів Інтернету БПЛА, зменшити міжшарову затримку передачі і конфлікт сигналів, тим самим ефективно зменшуючи затримку передачі даних в Інтернеті БПЛА.

Недоліки використання сценаріїв. Одним з суттєвих недоліків всіх чотирьох сценаріїв є оптимізація траєкторії БПЛА. Незважаючи на те, що БПЛА можуть мати унікальні характеристики, такі як мобільність та гнучкість, використовуючи БПЛА для бездротової передачі даних є складнішим в порівнянні з традиційними ретрансляційними комунікаціями. Оптимізація траєкторії є складною проблемою через велику кількість фізичних обмежень та високу мобільність БПЛА. Наприклад, при дослідженні траєкторії БПЛА на предмет максимальної швидкості до вузла призначення необхідно врахувати кілька факторів, таких як інформаційно-причинне обмеження, обмеження на потужність передачі, обмеження на початкове місцезнаходження, обмеження на швидкість та обмеження на кінцеве місцезнаходження.

Крім того, розв'язання задачі оптимізації безперервної траєкторії БПЛА також стикається з аналітичними проблемами, оскільки необхідно вирішити незліченну кількість змінних оптимізації (наприклад, положення декількох БПЛА). Також в бездротових мережах, що складаються з БПЛА, оптимізація траєкторії повинна враховувати кореляцію між мобільністю і продуктивністю мережі. При оптимізації траєкторії індекси оптимізації для різних типів БПЛА і різних польотних завдань відрізняються. Типові показники оптимізації включають найшвидший набір висоти, найбільшу тривалість польоту, найвищу енергоефективність і найшвидше прибуття. Тому аналіз відповідної траєкторії за різними індексами оптимізації є складним завданням.

Висновки. На основі проведеного літературного огляду було з'ясовано, що сучасні методи управління мобільними телекомунікаційними мережами спонукають до залучення безпілотних літальних апаратів з метою покращення з'єднання та передачі інформації на великі відстані. На основі наданої характеристики у вигляді чотирьох сценаріїв було з'ясовано, що ретрансляційне з'єднання є невід'ємною частиною бездротового зв'язку для БПЛА.

У сценарії 1 розглядається використання одиночних БПЛА як ретрансляційних вузлів для передачі інформації між джерелом (S) і приймачем (D), коли прямий зв'язок між ними відсутній. БПЛА діє як проміжна ланка, забезпечуючи зв'язок. Хоча цей сценарій є простим, можуть виникати труднощі, пов'язані з: варіаціями в мобільності та стаціонарності пари S-D; наявністю кількох джерел інформації, що потребують ретрансляції; різними режимами ретрансляції (підсилення-передача або декодування-передача); вибором оптимального місця або траєкторії польоту БПЛА для ретрансляції.

У сценарії 2 розглядається використання одного БПЛА для передачі інформації між кількома парами користувачів, де всі користувачі неспроможні до прямого зв'язку. Основні припущення щодо використання Багатокористувацьких мереж ретрансляції БПЛА містять наступне: множинний доступ (що складається з розробки ефективного протоколу планування множинного доступу для уникнення перешкод між користувачами); розподіл потужності (де важливо оптимізувати розподіл потужності для покращення продуктивності передачі в багатокористувацькій мережі); буферизація (де БПЛА повинні мати можливість буферизації даних, оскільки прямий реальний час передачі може бути неможливим через різні стани каналів); спектральна ефективність (де використання релейних систем дозволяє проводити одночасну передачу та прийом інформації на одній частоті, що підвищує спектральну ефективність та гнучкість мережі).

У сценарії 3 розглядається використання кількох БПЛА для ретрансляції інформації між джерелом (S) та приймачем (D) на земній поверхні, де було з'ясовано наступне: кількість ретрансляторів (де необхідно визначити оптимальну кількість БПЛА, щоб сусідні ретранслятори не були надто далеко один від одного, що вплине на якість зв'язку, і не були занадто близько, що створюватиме взаємні перешкоди); оптимізація позиціонування траєкторії (де важливо оптимізувати позиції або траєкторії кількох БПЛА для забезпечення ефективного зв'язку); протокол багатоходової ретрансляції (де необхідно розробити протокол багатоходової ретрансляції, що враховує напрямок передачі інформації та режим ретрансляції); одностороння передача (де для односторонньої передачі інформації необхідно використовувати схему декодування-передача з рівною пропускну здатністю для прийому і передачі інформації, що мінімізує затримки)

У 4 сценарії розглядається використання Інтернету БПЛА для забезпечення масштабного і гнучкого ретрансляційного зв'язку у багатокористувацьких мережах, де було з'ясовано наступне: масштабний зв'язок (де група БПЛА може утворювати мережу для двосторонніх багатокористувацьких зв'язків, забезпечуючи багатошарову ретрансляційну площину); гнучкі з'єднання (де зв'язок між наземними користувачами і БПЛА може змінюватися з часом, що вимагає нових архітектурних рішень); оптимізація розгортання (позиційне розгортання БПЛА безпосередньо впливає на якість покриття і зв'язність мережі, визначаючи топологію і надійність); комунікація та маршрутизація (де спільна оптимізація комунікації і маршрутизації кількох БПЛА є ключовою для надійного зв'язку); ефективне розгортання (де необхідно розробити схеми безперервного розгортання БПЛА з низьким рівнем складності для покращення покриття мережі і пропускну здатності); вимоги до надійності (де Інтернет БПЛА матиме значно високі вимоги до надійності і навантаження на систему).

Тому проаналізувавши всі 4 сценарії можна зробити висновок, що кожен з сценаріїв ретрансляції може містити ряд переваг, які можуть покращувати якість з'єднання для обміну інформації. Проте, одним з суттєвих недоліків використання все ж таки залишається оптимізація траєкторії БПЛА, що потребує подальшого дослідження та аналізу.

Список бібліографічного опису

1. Sharma, A., Vanjani, P., Paliwal, N., Basnayaka, C. M. W., Jayakody, D. N. K., Wang, H. C., & Muthuchidambaranathan, P. (2020). Communication and networking technologies for UAVs: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 168, 1-18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739> (дата звернення: 21.07.2024)
2. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y. H., & Debbah, M. (2019). A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE communications surveys & tutorials*, 21(3), 2334-2360. URL: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862> (дата звернення: 21.07.2024)
3. Nawaz, H., Ali, H. M., & Laghari, A. A. (2021). UAV communication networks issues: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1349-1369. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09418-0> (дата звернення: 21.07.2024)
4. Hentati, A. I., & Fourati, L. C. (2020). Comprehensive survey of UAVs communication networks. *Computer Standards & Interfaces*, 72, 1-33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103451> (дата звернення: 21.07.2024)
5. Ghamari, M., Rangel, P., Mehrubeoglu, M., Tewolde, G. S., & Sherratt, R. S. (2022). Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: A review. *IEEE Access*, 10, 102492-102531. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208571> (дата звернення: 21.07.2024)
6. Sun, Y., Wang, T., & Wang, S. (2019). Location optimization and user association for unmanned aerial vehicles assisted mobile networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(10), 10056-10065. URL: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2933560> (дата звернення: 21.07.2024)
7. Guirado, R., Padró, J. C., Zoroa, A., Olivert, J., Bukva, A., & Cavestany, P. (2021). Stratotrans: Unmanned aerial system (uas) 4g communication framework applied on the monitoring of road traffic and linear infrastructure. *Drones*, 5(1), 1-14. URL: <https://doi.org/10.3390/drones5010010> (дата звернення: 21.07.2024)
8. Khan, S. K., Naseem, U., Siraj, H., Razzak, I., & Imran, M. (2021). The role of unmanned aerial vehicles and mmWave in 5G: Recent advances and challenges. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(7), pp. 1-18. URL: <https://doi.org/10.1002/ett.4241> (дата звернення: 21.07.2024)
9. Mkiramweni, M. E., Yang, C., Li, J., & Zhang, W. (2019). A survey of game theory in unmanned aerial vehicles communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3386-3416. URL: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2919613> (дата звернення: 21.07.2024)
10. Mozaffari, M. (2018). Wireless communications and networking with unmanned aerial vehicles: fundamentals, deployment, and optimization, 177-190. URL: <http://hdl.handle.net/10919/83921> (дата звернення: 21.07.2024)
11. Ezeigweneme, C. A., Umoh, A. A., Ilojiana, V. I., & Adegbite, A. O. (2024). Telecommunications energy efficiency: optimizing network infrastructure for sustainability. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(1), 26-40. URL: <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i1.700> (дата звернення: 21.07.2024)
12. Rakushev, M., Zuiko, V., Pantiushenko, R., Nozdrachov, O., Khomenko, V., & Chornomaz, O. (2022, December). The Technique of the Information and Telecommunication System" Terminal" Use for UAVs Acquired Data. In *2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 208-212. URL: <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024215> (дата звернення: 21.07.2024)
13. Bashir, M. N., & Yusof, K. M. (2020). A review of relay network on uavs for enhanced connectivity. *Jurnal Teknologi*, 82(1), 173-183. URL: <https://doi.org/10.11113/jt.v82.13183> (дата звернення: 21.07.2024)
14. Euler, S., Maattanen, H. L., Lin, X., Zou, Z., Bergström, M., & Sedin, J. (2019, April). Mobility support for cellular connected unmanned aerial vehicles: Performance and analysis. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2019.8885820> (дата звернення: 21.07.2024)
15. Li, B., Zhao, S., Miao, R., & Zhang, R. (2021). A survey on unmanned aerial vehicle relaying networks. *IET communications*, 15(10), 1262-1272. URL: <https://doi.org/10.1049/cmu2.12107> (дата звернення: 21.07.2024)

References

1. Sharma A., Vanjani P., Paliwal N., Basnayaka C. M. W., Jayakody D. N. K., Wang H. C., & Muthuchidambaranathan P. (2020). Communication and networking technologies for UAVs: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 168, 1-18. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739> (access date: 21.07.2024)
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y. H., & Debbah M. (2019). A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE communications surveys & tutorials*, 21(3), 2334-2360. URL: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862> (access date: 21.07.2024)
3. Nawaz H., Ali H. M., & Laghari A. A. (2021). UAV communication networks issues: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1349-1369. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09418-0> (access date: 21.07.2024)
4. Hentati A. I., & Fourati L. C. (2020). Comprehensive survey of UAVs communication networks. *Computer Standards & Interfaces*, 72, 1-33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103451> (access date: 21.07.2024)

5. Ghamari M., Rangel, P., Mehrubeoglu M., Tewolde G. S., & Sherratt R. S. (2022). Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: A review. *IEEE Access*, 10, 102492-102531. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3208571> (access date: 21.07.2024)
6. Sun Y., Wang T., & Wang S. (2019). Location optimization and user association for unmanned aerial vehicles assisted mobile networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(10), 10056-10065. URL: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2933560> (access date: 21.07.2024)
7. Guirado R., Padró J. C., Zoroa A., Olivert J., Bukva A., & Cavestany P. (2021). Stratotrans: Unmanned aerial system (uas) 4g communication framework applied on the monitoring of road traffic and linear infrastructure. *Drones*, 5(1), 1-14. URL: <https://doi.org/10.3390/drones5010010> (access date: 21.07.2024)
8. Khan S. K., Naseem U., Siraj H., Razzak I., & Imran M. (2021). The role of unmanned aerial vehicles and mmWave in 5G: Recent advances and challenges. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(7), pp. 1-18. URL: <https://doi.org/10.1002/ett.4241> (access date: 21.07.2024)
9. Mkiramweni M. E., Yang C., Li J., & Zhang W. (2019). A survey of game theory in unmanned aerial vehicles communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3386-3416. URL: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2919613> (access date: 21.07.2024)
10. Mozaffari M. (2018). Wireless communications and networking with unmanned aerial vehicles: fundamentals, deployment, and optimization, 177-190. URL: <http://hdl.handle.net/10919/83921> (access date: 21.07.2024)
11. Ezeigweneme C. A., Umoh A. A., Ilojiana V. I., & Adegbite A. O. (2024). Telecommunications energy efficiency: optimizing network infrastructure for sustainability. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(1), 26-40. URL: <https://doi.org/10.51594/csitrij.v5i1.700> (access date: 21.07.2024)
12. Rakushev M., Zuiko V., Pantiusenko R., Nozdrachov O., Khomenko V., & Chornomaz O. (2022, December). The Technique of the Information and Telecommunication System" Terminal" Use for UAVs Acquired Data. In *2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 208-212. URL: <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024215> (access date: 21.07.2024)
13. Bashir M. N., & Yusof K. M. (2020). A review of relay network on uavs for enhanced connectivity. *Jurnal Teknologi*, 82(1), 173-183. URL: <https://doi.org/10.11113/jt.v82.13183> (access date: 21.07.2024)
14. Euler S., Maattanen H. L., Lin X., Zou Z., Bergström M., & Sedin J. (2019, April). Mobility support for cellular connected unmanned aerial vehicles: Performance and analysis. In *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6). URL: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2019.8885820> (access date: 21.07.2024)
15. Li B., Zhao S., Miao R., & Zhang R. (2021). A survey on unmanned aerial vehicle relaying networks. *IET communications*, 15(10), 1262-1272. URL: <https://doi.org/10.1049/cmu2.12107> (access date: 21.07.2024)