

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-16>

УДК 621.391

Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

Прикмета Андрій Володимирович, аспірант,

Олійник Андрій Олегович, аспірант,

Ксьондз Назарій Олексійович, магістр.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ЛІТАЮЧИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.В. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу. Розглянуті технології використання БПЛА у мережах зв'язку відкривають нові перспективи для забезпечення зв'язку в умовах, де традиційні методи можуть бути менш ефективними або недосяжними. Здійсненні дослідження моделі спільного трафіку Інтернету Речей (IoT), Тактильного Інтернету (TI) і доповненої реальності (AR) зумовлюють покращення якості обслуговування та управління мережами в умовах зростаючого розповсюдження цих видів трафіку. Визначено, що ймовірність втрат пакетів для трафіку AR більша, ніж для трафіку IoT і менша, ніж для трафіку TI, що може бути важливим для дизайну мереж і розробки механізмів виправлення помилок. Запропонована модель дозволяє оцінювати якість обслуговування для різних видів трафіку, включаючи затримку доставки і ймовірність втрати пакета, що важливо для забезпечення заданих рівнів обслуговування та планування мережі. Отримані результати дослідження сприяють розумінню та оптимізації мереж з урахуванням різних видів трафіку та дозволяють покращити ефективність мережевих систем в умовах зростаючої складності і різноманітності вимог користувачів. Аналіз можливостей та ефективності спільного використання технологій програмно-конфігурованих мереж, граничних обчислень і БПЛА вказує на можливість інтеграції різних технологій для оптимізації мереж. Розроблена модель мережі, в якій програмно-конфігуровані мережі повністю реалізовані на БПЛА, є інноваційною і може відкрити нові можливості для розвитку мереж зв'язку, особливо в умовах недоступних місць і надзвичайних ситуацій, а також сприяє розвитку мережевих технологій та визначає важливі напрямки досліджень для покращення ефективності і якості обслуговування в сучасних мережах зв'язку.

Отримані результати дослідження вказують на значний внесок у розробку методів кластеризації та оптимізації мереж з використанням БПЛА. Використання методу k-середніх для кластеризації БПЛА вказує на ефективний спосіб групування та управління цими пристроями для оптимізації мережевих ресурсів. Алгоритм кластеризації на основі k-середніх дозволяє знайти оптимальні координати контролерів, відкриває можливість ефективної організації груп БПЛА для кращого управління мережею. Метод вивантаження трафіку, який включає можливість безпосередньої передачі інформації на БПЛА або через ретранслятори, вказує на гнучкість та адаптивність системи передачі даних. Використання алгоритму динамічного програмування для визначення розміру груп БПЛА та затримки для вивантаження трафіку підкреслює важливість оптимізації ресурсів і якості обслуговування. Отже, результати відкривають шляхи для подальших досліджень і розробки інноваційних систем керування мережами з використанням БПЛА, які можуть бути застосовані у різних галузях, включаючи телекомунікації, надзвичайні ситуації та інші області.

Ключові слова: інтернет речей, тактильний інтернет, доповнена реальність, програмно-конфігурована мережа, безпілотний літальний апарат, адаптивна система передачі даних, алгоритм динамічного програмування, літаюча мережа доступу, сенсорна мережа, граничні обчислення, система масового обслуговування.

Vasylykivskiy M.V., Prykmeta A.V., Oliynyk A.O., Ksondz N.O. Optimization of software-configurable flying access networks. The considered technologies for using UAVs in communication networks open up new prospects for providing communication in conditions where traditional methods may be less effective or unavailable. The research on the model of joint traffic of the Internet of Things (IoT), Tactile Internet (TI) and Augmented Reality (AR) leads to an improvement in the quality of service and network management in the context of the growing proliferation of these types of traffic. It has been determined that the probability of packet loss for AR traffic is higher than for IoT traffic and lower than for TI traffic, which can be important for network design and the development of error correction mechanisms. The proposed model allows us to evaluate the quality of service for different types of traffic, including delivery delay and packet loss probability, which is important for ensuring specified service levels and network planning. The obtained results of the study contribute to the understanding and optimization of networks taking into account different types of traffic and allow to improve the efficiency of network systems in the face of increasing complexity and diversity of user requirements. The analysis of the possibilities and efficiency of joint use of software-configurable networks, edge computing, and UAV technologies indicates the possibility of integrating different technologies to optimize networks. The developed network model, in which software-configurable networks are fully implemented on UAVs, is innovative and can open up new opportunities for the development of communication networks, especially in inaccessible places and emergencies, and also contributes to the development of network technologies and identifies important areas of research to improve the efficiency and quality of service in modern communication networks.

The results of the study indicate a significant contribution to the development of methods for clustering and optimizing networks using UAVs. The use of the k-means method for clustering UAVs indicates an effective way to group and manage these devices to optimize network resources. The k-means-based clustering algorithm allows you to find the optimal coordinates of the controllers, opening up the possibility of effectively organizing groups of UAVs for better network management. The method of traffic offloading, which includes the possibility of direct transmission of information to UAVs or through repeaters, indicates the flexibility and adaptability of the data transmission system. The use of a dynamic programming algorithm to determine the size of UAV groups and the delay for offloading traffic emphasizes the importance of optimizing resources and quality of service. Thus, the results open the way for further research and development of innovative network management systems using UAVs that can be applied in various fields, including telecommunications, emergency situations, and other areas.

Keywords: Internet of Things, haptic Internet, augmented reality, software-defined network, unmanned aerial vehicle, adaptive data transmission system, dynamic programming algorithm, flying access network, sensor network, edge computing, queuing system

Постановка наукової проблеми. Дослідження проблем створення мереж на основі спільного використання технологій БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень для забезпечення вимог до якості обслуговування в мережах зв'язку п'ятого покоління є важливим напрямком в розвитку телекомунікаційних технологій і мереж. Інновації в цій галузі в останні кілька років були вражаючими і призвели до створення нових можливостей і концепцій. Розвиток бездротових мереж і систем зв'язку стає ключовим фактором в сучасному світі, впливаючи на багато галузей, від медицини і виробництва до розваг і транспорту. Активна робота у цій області продовжується, і можна очікувати, що нові технології будуть надавати неймовірні можливості для подальшого розвитку суспільства [1].

Використання БПЛА у мережах зв'язку п'ятого покоління (5G) дійсно відкриває широкі можливості для різних сфер застосування. З врахуванням розвитку технологій 5G та автоматизованих систем керування, БПЛА можуть стати важливою складовою мережі майбутнього, яка буде підтримувати різноманітні сценарії застосування та вирішувати завдання у сфері зв'язку та обслуговування в умовах зростаючих вимог до мобільності та зв'язку [2].

Класифікація БПЛА за мережевими характеристиками є важливою для визначення їхньої придатності для різних застосувань у телекомунікаціях і мережах зв'язку. Вибір конкретного типу БПЛА залежить від конкретних потреб і вимог проекту, таких як покриття, обсяг передачі даних, тривалість польоту, вартість, а також регуляторні обмеження і умови використання. Застосування низьколітаючих БПЛА у мережах зв'язку може забезпечити покращену доступність, покриття та якість послуг для користувачів, особливо в областях з обмеженим інфраструктурним покриттям або в умовах екстрених ситуацій [3].

Дослідження та ідеї щодо використання БПЛА в сенсорних мережах (WSNs) є дуже цікавими і актуальними в контексті оптимізації збору даних і енергоспоживання в мережах сенсорів. Підходи для оптимізації роботи сенсорних мереж і зменшення енергоспоживання за допомогою використання БПЛА можуть бути корисними для різних застосувань, таких як моніторинг навколишнього середовища, віддалений моніторинг або надання допомоги в екстрених ситуаціях. Дослідження в цьому напрямку допомагають розвивати більш ефективні та енергоефективні мережі сенсорів з використанням передових технологій БПЛА [4].

Можливості застосування БПЛА у співпраці з мережами Інтернету Речей (IoT) дійсно вражає своєю широкою функціональністю та корисністю. Використання БПЛА в поєднанні з IoT показують значний потенціал для покращення різних галузей, зменшення витрат енергії та збільшення надійності збору та обробки даних. Дослідження та розвиток цих технологій продовжують надавати нові можливості для інтеграції БПЛА із мережами IoT з метою створення більш ефективних та стійких систем зв'язку і моніторингу [5]. Актуальність досліджень зумовлена необхідністю створення мереж зв'язку, які можуть ефективно відповідати на сучасні вимоги і забезпечувати надійне та швидке обслуговування користувачів у світі, де мережі постійно розширюються та змінюються.

Метою роботи є: способи оптимізації інтегрованих літаючих програмно-керованих мереж доступу для підвищення швидкості передачі даних та зменшення затримки за рахунок ефективного використання БПЛА.

Аналіз досліджень. Підтримка зв'язності в умовах відсутності інфраструктурного зв'язку є однією з ключових функцій БПЛА в мережах зв'язку. Ця можливість дозволяє забезпечити зв'язок між пристроями навіть в труднодоступних чи незвичайних умовах. Підсумовуючи, можна сказати, що БПЛА мають важливе значення у забезпеченні зв'язності в умовах відсутності інфраструктурного зв'язку або в умовах, коли потрібно оперативно забезпечити зв'язок у важкодоступних або надзвичайних ситуаціях. Ця технологія розширює можливості мереж зв'язку та допомагає вирішувати різноманітні завдання у різних галузях. Функціонування БПЛА як літаючих базових станцій (UAV-BS) є цікавим сценарієм в мережах майбутнього. Цей підхід дозволяє використовувати БПЛА для забезпечення додаткової ємності мережі та покращення покриття в умовах тимчасових заходів, важкодоступних місць, а також у надзвичайних ситуаціях. Щоб оптимізувати функціонування БПЛА як літаючих базових станцій, дослідники вивчають різні аспекти, такі як оптимальна висота розташування, управління рухом, мінімізація інтерференції та

забезпечення покриття для наземних користувачів. Це дозволяє забезпечити надійний і ефективний зв'язок в умовах, коли інші засоби зв'язку можуть бути недостатніми або недоступними [6].

Функціонування БПЛА як мобільних ретрансляторів для подолання перешкод у мережах зв'язку є важливим сценарієм, особливо в умовах, коли потрібно забезпечити надійний зв'язок між віддаленими користувачами та базовою станцією. Загалом, використання БПЛА як мобільних ретрансляторів дозволяє підвищити надійність та доступність зв'язку в умовах, коли інші засоби зв'язку можуть бути неефективними або недоступними. Використання БПЛА для бездротової транзитної передачі є дієвим способом подолання обмежень та забезпечення надійного зв'язку в мережах радіодоступу, особливо в умовах географічних обмежень та перешкод. В цілому, використання БПЛА для транзитної передачі може значно підвищити продуктивність і надійність мереж радіодоступу, зокрема в умовах обмежень, перешкод і географічних факторів [7].

Використання БПЛА в мережах 5G дозволяє оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів, підвищити надійність зв'язку та забезпечити більш ефективне управління ресурсами мережі для задоволення потреб різних користувачів і послуг. Концепція граничних обчислень MEC вирішує проблеми з обчислювальною потужністю та тривалістю життя батареї для пристроїв IoT та інших пристроїв з обмеженими ресурсами. Додавання БПЛА до цієї концепції може покращити її ефективність та розширити можливості. Загалом, використання БПЛА для підтримки концепції граничних обчислень може значно покращити якість обслуговування, знизити енергоспоживання та сприяти розвитку IoT та інших ресурсомістких додатків [8].

Перенесення обчислень на віддалені граничні сервери (MEC) може допомогти поліпшити обчислювальні можливості БПЛА і вирішити обмеження, пов'язані з їхнім обчислювальним ресурсами та обмеженими розмірами. Такий підхід дозволяє БПЛА використовувати віддалені обчислювальні ресурси для виконання складних обчислень, які перевищують їхні можливості. Однак важливо враховувати, що оптимізація та управління розподілом обчислень між БПЛА та серверами MEC можуть вимагати розробки ефективних алгоритмів та стратегій, особливо в умовах обмежених ресурсів та змінних умов польоту БПЛА [9].

Розгортання БПЛА з можливістю кешування відкриває нові можливості для покращення якості обслуговування користувачів в бездротових мережах. Узагальнюючи, використання БПЛА з підтримкою кешування може значно покращити продуктивність та ефективність бездротових мереж, що призводить до задоволення потреб користувачів та зниження витрат на обслуговування мережі [10].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Розвиток та впровадження нових мережевих технологій і архітектур дуже важливий для забезпечення високої якості обслуговування та забезпечення потреб сучасних користувачів і пристроїв у глобальному мережевому середовищі. Застосування SDN перетворює мережі зв'язку, забезпечуючи більшу гнучкість, оптимізацію ресурсів і краще управління трафіком. Такі технології стають невід'ємною частиною розвитку мереж п'ятого і наступних поколінь. В цілому, рівень додатків є ключовою складовою програмно-конфігурованих мереж SDN, яка дозволяє надавати різноманітні послуги користувачам і забезпечувати ефективне управління та функціонування мережі. Усі функції рівня управління допомагають забезпечити ефективне функціонування програмно-конфігурованої мережі SDN, підвищуючи її надійність, ефективність і гнучкість. Усі функції рівня даних допомагають забезпечити надійну та ефективну передачу даних в мережі SDN, забезпечуючи виконання інструкцій, визначених на рівні управління, та забезпечуючи безпеку і відмовостійкість мережі. Завдяки відкритим інтерфейсам, SDN надає можливість розробляти і впроваджувати різноманітні мережеві додатки та сервіси, що робить цю технологію дуже гнучкою і адаптованою до конкретних потреб мережі [11].

Важливо відзначити, що південний інтерфейс (наприклад, OpenFlow) забезпечує стандартизований спосіб взаємодії між контролерами і мережевими пристроями, тоді як північний інтерфейс є більш гнучким і дозволяє розробникам створювати різноманітні додатки та послуги для управління мережею, відповідно до конкретних потреб бізнесу або користувачів. Абстрактна модель поділу рівнів в архітектурі мережі SDN допомагає створити більш гнучку та ефективну мережеву інфраструктуру. Абстрактна архітектура дозволяє розділити функціональність мережі на два рівні і забезпечує стандартизацію інтерфейсів, що робить розробку та управління мережею більш прозорими та ефективними завдяки зменшенню складності та підвищенню гнучкості мережевої інфраструктури [1-3].

Додатково, важливо відзначити, що проблема розміщення контролерів є однією з ключових проблем у мультиконтролерних програмно-конфігурованих мережах SDN. Ця проблема стоїть © Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.О.

перед великими викликами, оскільки правильний розподіл контролерів може суттєво вплинути на продуктивність, масштабованість, надійність та вартість мережі SDN. Для вирішення цих проблем дослідники використовують різні методи, включаючи математичне моделювання, алгоритми оптимізації, машинне навчання та експериментальні підходи. Процес розміщення контролерів може бути динамічним і реагувати на зміни у мережі та трафіку, щоб забезпечити ефективну роботу мережі SDN [4].

В мережах SDN існують різні стратегії для фізичного і логічного розподілу ресурсів і контролерів, які потребують ефективної взаємодії між контролерами для обміну інформацією про стан сусідніх доменів, а також для вирішення проблем та оптимізації ресурсів. Вибір конкретної стратегії залежить від характеристик мережі, вимог до мережі та обсягу координації між контролерами.

Протокол HyperFlow представляє собою важливий крок у розвитку архітектур керування мережами SDN. Основна ідея HyperFlow полягає в розподіленому керуванні мережею з використанням локальних контролерів та співпраці між ними для ефективного управління мережею. Загалом HyperFlow і система Onix роблять акцент на розподіленому керуванні мережею, що дозволяє покращити масштабованість, надійність і продуктивність мереж SDN. Вони допомагають вирішувати проблеми, пов'язані з управлінням великими та складними мережами, і впроваджують нові методи координації між контролерами та комутаторами для забезпечення ефективного функціонування мережі SDN [5].

Дослідження розробок у сфері масштабованості мереж SDN добре відображає різноманітні підходи та стратегії, які використовуються для поліпшення масштабованості та продуктивності таких мереж. Розподіл NIB дозволяє кожному контролеру зберігати та керувати інформацією лише для свого сегмента мережі. Це зменшує навантаження на кожен контролер та дозволяє масштабувати мережу. Ієрархічна структура контролерів, де контролери об'єднуються в кластери, дозволяє краще керувати розподіленими мережами. Це може поліпшити координацію та керування на різних рівнях мережі. Забезпечення взаємодії між додатками та контролерами є ключовим аспектом для забезпечення стійкості та ефективності мережі. Механізми сумісності та стійкості станів допомагають уникнути конфліктів та непередбачуваних станів. STN надає інтерфейс для узгодженості політики обслуговування трафіку між контролером та площиною даних. Це допомагає забезпечити коректну роботу та зменшити ризик конфліктів політик. ElasticCon динамічно розподіляє навантаження між контролерами, що дозволяє керувати навантаженням на контролери в реальному часі. Це важливо для забезпечення оптимального використання ресурсів. Система DISCO використовує кластеризацію контролерів для управління різними доменами мережі та обміну інформацією між контролерами. Це дозволяє забезпечити гнучкість мережі при зміні конфігурації. Методика маршрутизації потоку допомагає визначити, який контролер буде керувати певним потоком. Це може базуватися на різних факторах, включаючи стан мережі та навантаження на контролери. Ці підходи та системи спрямовані на вирішення проблем масштабованості в мережах SDN, забезпечуючи кращий розподіл завдань та ресурсів між контролерами, а також полегшуючи координацію та управління мережею в умовах збільшеного обсягу даних і трафіку. Вони допомагають зробити мережі SDN більш гнучкими, надійними та ефективними [6].

Ієрархічна архітектура SDN, яка включає багаторівневий рівень управління, може бути ефективним рішенням для поліпшення масштабованості та продуктивності мережі SDN (рис. 1) [7].

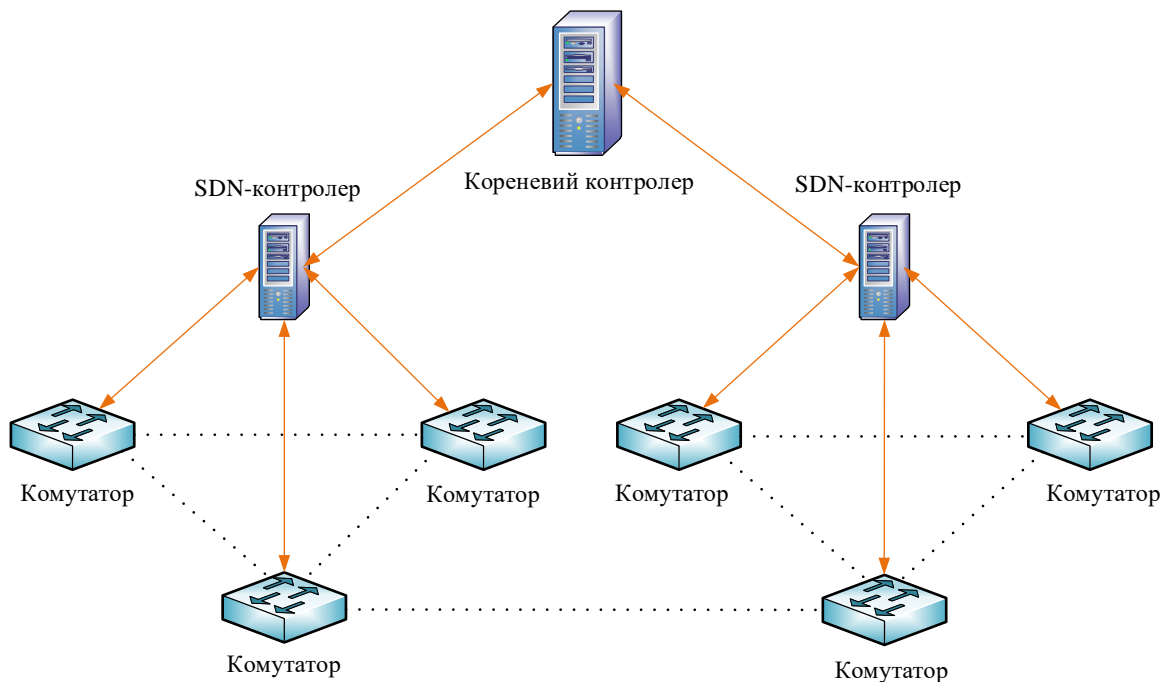


Рисунок 1 – Ієрархічна мультиконтролерна мережа SDN

Така ієрархічна архітектура може бути корисною для великих та складних мереж SDN, де необхідно ефективно розподіляти завдання між різними рівнями керування та зменшувати навантаження на централізовану площину управління. Ця архітектура також сприяє покращенню масштабованості та ефективності мережі SDN, що дозволяє краще відповідати потребам великих та розподілених мережевих середовищ. Архітектурні рішення та підходи до організації площини управління в мережах SDN відображають багатоаспектність та різноманітність можливих підходів до оптимізації масштабованості, ефективності та робастності таких мереж [8].

Мережі БПЛА можуть значно виграти від впровадження концепцій та технологій SDN. Система для управління зв'язком БПЛА на основі SDN використовує контролер SDN для оптимізації використання мережевих ресурсів, зниження затримок та підвищення пропускної здатності мережі БПЛА. Централізований контролер дозволяє забезпечувати ефективне керування трафіком і пріоритетами пакетів. Централізована диференціальна маршрутизація трафіку (TDR) використовує два контролери - контролер координації та контролер кластера SDN. Це допомагає забезпечити високий рівень якості обслуговування (QoS) і надійності для з'єднань, чутливих до затримок, у мережах БПЛА. Гібридна технологія SDN для мереж БПЛА та IoT використовує гібридний підхід, де деякі БПЛА працюють у мережах SDN, а інші використовують традиційні протоколи маршрутизації. Це дозволяє різним типам БПЛА співіснувати та співпрацювати в одній мережі. Багатошляхова маршрутизація на основі SDN використовує багатопланову графову модель для планування маршрутів у тривимірному просторі, щоб забезпечити стійкість мережі і уникнути перекриття маршрутів. Архітектура мережі мобільних датчиків на основі SDN спрямована на підвищення доступності та забезпечення надійного передавання даних у роях БПЛА. Вона використовує централізований сервер SDN для ефективного керування роями БПЛА та управління мережею. Літаюча всепроникна сенсорна мережа (FUSN) на основі SDN у якій БПЛА виступають як програмні комутатори та контролери, що дозволяє ефективно збирати дані від мобільних датчиків на землі. Це може спростити збір та обробку інформації у реальному часі. Використання предиктивної SDN для підвищення доступності мережі забезпечує можливість передбачати майбутнє розташування БПЛА та планувати маршрути та зміни топології заздалегідь, що допомагає максимально підвищити доступність мережі. Ці архітектурні рішення розвиваються для забезпечення оптимального управління мережами БПЛА, підвищення надійності та зниження затрат. Однак важливо враховувати особливості конкретних застосувань та вимоги до мережі при виборі підходу до її організації.

Розглянемо важливі тенденції у розвитку телекомунікаційних технологій, особливо у контексті мереж 5G і їх впливу на різні аспекти сучасного життя. Інтернет речей (IoT) стає все більш важливим елементом телекомунікаційних мереж. Це дозволяє підключати мільярди пристроїв і датчиків до мережі, що веде до доступності великої кількості інформації та можливості розвивати

аналітичні та прийняття рішень. Технологія тактильного інтернету передбачає ультрамалі затримку і високий рівень якості обслуговування і використовується для взаємодії між людьми та машинами в режимі реального часу, такими як роботи і аватари. Вона може використовувати різні мережеві технології для досягнення своїх цілей. Доповнена реальність (AR) вимагає низької затримки та використовується в різних додатках, включаючи галузі як медицина, ігрова індустрія, технічне обслуговування тощо. Вона створює вимоги до мереж зв'язку, таких як доступність, надійність і стабільність. Трафік, створюваний пристроями IoT, має свої особливості і вимагає досліджень та оцінки впливу на якість обслуговування (QoS). Розроблено моделі трафіку та методи оцінки QoS для IoT, що допомагає оптимізувати мережеві ресурси. Загалом, концепція IoT перетворює наше оточення в "розумний світ", де об'єкти можуть спілкуватися, виконувати завдання і полегшувати життя людей і підприємств. Ця концепція відіграє важливу роль у розвитку телекомунікаційних технологій і динамічному зміні способу, яким ми взаємодіємо з технологією. Отже, IoT є ключовою технологічною концепцією, яка перетворює спосіб, яким ми взаємодіємо з технологією та нашим оточенням. Ця концепція відкриває безмежні можливості для підключення та використання різних об'єктів у реальному часі і має широкий вплив на інфокомунікаційну галузь. Усі ці аспекти вказують на необхідність постійного розвитку і адаптації телекомунікаційних мереж до різноманітних вимог, які ставлять перед ними нові технології і застосунки. Такий розвиток веде до покращення доступності послуг і розширення можливостей для споживачів і підприємств у всіх сферах життя [9].

Робота з аналітичною моделлю для оцінювання QoS в мережах 5G та інших поколінь має важливе значення, оскільки вона дозволяє аналізувати вплив різноманітного трафіку на якість обслуговування та сприяє розвитку телекомунікаційних технологій і допомагає забезпечити високу якість обслуговування в умовах зростаючого обсягу різноманітного трафіку в мережах 5G та подальших поколінь.

Тактильний Інтернет є захоплюючим напрямком розвитку інфокомунікаційних технологій, який має потенціал змінити спосіб, яким ми взаємодіємо з оточуючим світом і іншими людьми. Цей напрямок орієнтований на передачу в реальному часі тактильних відчуттів і відкриває безмежні можливості для інтерактивних застосунків та дистанційного керування фізичними об'єктами. Отже, тактильний Інтернет відкриває нові горизонти для інтерактивності, контролю та спілкування у реальному часі. Він вже став об'єктом активних досліджень і розвитку, і має потенціал вплинути на багато аспектів нашого повсякденного життя та промисловості [10].

Доповнена реальність (AR) відкриває безмежні можливості для розширення нашого сприйняття світу і покращення взаємодії з ним. AR дозволяє накладати віртуальну інформацію на реальний світ, створюючи інтерактивний інтерфейс для користувачів. У цілому, доповнена реальність є важливим напрямком розвитку інфокомунікаційних технологій, який може змінити спосіб, яким ми сприймаємо та взаємодіємо зі світом навколо нас. Вона відкриває нові можливості для навчання, розваг, роботи та багато інших сфер нашого життя.

Моделі трафіку грають важливу роль в розумінні та управлінні мережами, дозволяючи аналізувати та передбачати роботу мережі в різних сценаріях та умовах. Різні типи послуг, такі як перегляд веб-сторінок, електронна пошта, потокове мультимедіа і VoIP, можуть генерувати різні обсяги трафіку та мати різні вимоги щодо якості обслуговування. Розуміння цих типів послуг є важливим для ефективного управління мережею. Вимірювання обсягу трафіку, що генерується кожною послугою, допомагає визначити, які послуги є найбільш вимогливими до ресурсів мережі. Це може бути корисним для розподілу ресурсів і планування мережі. Визначення часу, коли трафік досягає свого максимального рівня, допомагає розробникам мережі планувати і розгортати ресурси так, щоб вони могли витримувати навантаження в пікові часи. Розуміння імітації потоку запитів, який користувачі створюють під час взаємодії з мережею, допомагає у визначенні оптимальної обробки цих запитів, зокрема для забезпечення низької затримки та високої доступності. Розрізняючи між однорідним і гетерогенним трафіком, можна краще розуміти різноманітність трафіку в мережі. Це важливо для налагодження ресурсів і прийняття рішень щодо мережевого управління. Визначення функції розподілу часових інтервалів між запитами допомагає в моделюванні та прогнозуванні трафіку в реальному часі. Застосування моделей трафіку допомагає мережевим інженерам і адміністраторам планувати, розгортати і управляти мережами більш ефективно, забезпечуючи високу якість обслуговування для різних типів послуг і користувачів [11].

Моделі трафіку є необхідними для оптимізації ресурсів мережі, планування капіталовкладень та забезпечення надійності та ефективності мережевого обслуговування. Вони допомагають розуміти та аналізувати складність трафіку в сучасних мережах зв'язку, зокрема в Інтернеті. У

© Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.О.

реальних мережах трафік часто не є ідеальною моделлю Пуасона або групового пуасонівського потоку. Тому важливо також мати можливість адаптувати моделі до конкретних умов і спостерігати за реальним трафіком для забезпечення ефективності мережі. Особливо у сучасних мережах, таких як Інтернет, де трафік може бути дуже різноманітним і динамічним, а аналіз самоподібного трафіку може бути корисним інструментом для оптимізації ресурсів і мережевого управління [1, 2].

Різні мережі можуть вимагати різних підходів до обслуговування, залежно від їх особливостей та вимог користувачів. Правильний вибір дисципліни обслуговування та адекватне моделювання трафіку можуть допомогти забезпечити високу якість обслуговування в мережі. Знання теорії масового обслуговування та використання математичних моделей допомагають інженерам і адміністраторам мереж зрозуміти, аналізувати та оптимізувати роботу мережі зв'язку для забезпечення надійного та ефективного обслуговування користувачів.

Запропонована системна модель включає три види генераторів трафіку і об'єднує їх в один вузол, де потік надходить у систему масового обслуговування (СМО) з комбінованою дисципліною обслуговування, як показано на рисунку 2.

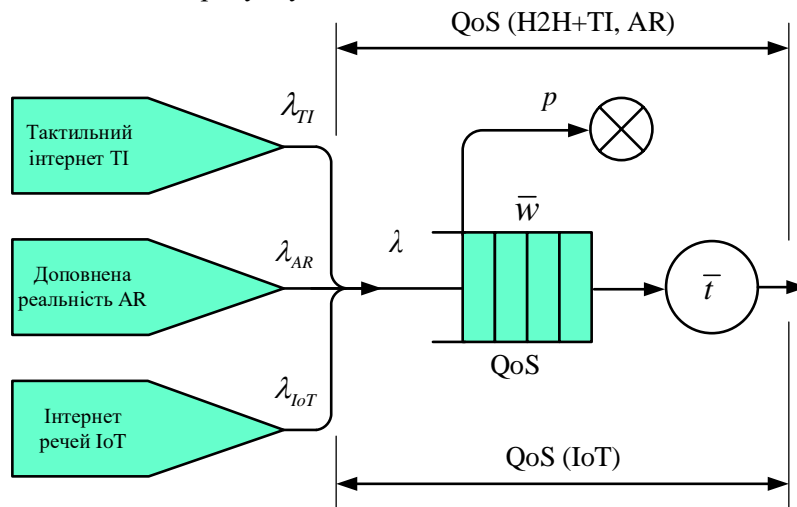


Рисунок 2 – Системна модель

Об'єднання цих типів трафіку в один вузол і подальший аналіз у системі масового обслуговування з комбінованою дисципліною обслуговування допомагають визначити, як мережа впорається з різними видами трафіку та як можливо поліпшити якість обслуговування для різних типів користувачів і пристроїв. Це моделювання може бути корисним для аналізу та тестування якості обслуговування мережі в умовах різних видів трафіку та навантажень.

У подальшому аналізі важливо буде врахувати характеристики кожного типу трафіку, такі як інтенсивність надходження, обсяги даних, та реакцію мережі на цей трафік для забезпечення оптимальної якості обслуговування.

Для оцінки QoS розглядається ймовірність відмови в обслуговуванні (втрати пакетів) і затримка пакетів. Ці метрики допомагають визначити, наскільки ефективно мережа зв'язку впоралася з різними типами трафіку. Особливо важливо це для послуг, де затримка та надійність є критичними, наприклад, для медичних систем або систем безпеки. Дослідження цих аспектів допомагає визначити оптимальні стратегії для управління різними типами трафіку IoT для забезпечення високої якості обслуговування в мережах зв'язку.

Розглянемо аналітичну модель для оцінки ймовірності втрат і затримки пакетів за рахунок часу очікування в черзі та тривалості обслуговування, представлену моделлю G/G/1/k. Для оцінки ймовірності втрати пакетів за відомих параметрів розподілу, що описують трафік і процес обслуговування пакетів [4], може бути використано вираз:

$$p = \frac{1-p}{2} p^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b} \quad (1)$$

$$1 - p^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b + 1}$$

де p - завантаження системи; n_b - розмір буфера; C_a^2 і C_s^2 - квадратичні коефіцієнти варіації розподілу вхідного потоку і тривалості обслуговування відповідно.

Рівняння для оцінки часу доставки пакетів [5]:

$$T = \frac{p\bar{t}}{2(1-p)} \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left(\frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t} \quad (2)$$

де σ_a^2 і σ_s^2 - значення дисперсій інтервалу часу між надходженням пакетів і тривалості обслуговування відповідно; \bar{a} - середнє значення інтервалу між пакетами; \bar{t} - середня тривалість обслуговування.

Відомо, що потоки трафіку ПІ і AR мають властивості самоподібних потоків. Трафік же IoT можна віднести до детермінованих потоків [6], оскільки найчастіше в додатках IoT цей трафік формується шляхом періодичного процесу надсилання даних системи моніторингу та/або диспетчерського управління [7].

Безпілотні літальні апарати мають значний потенціал для розширення можливостей мереж зв'язку та інфраструктури. Ключові аспекти цього застосування: збільшення зони покриття, передача інформації від віддалених користувачів, збір даних із сенсорних полів, інтеграція з програмно-конфігурованими мережами (SDN), мережі граничних обчислень, ретрансляція. Системи 5G і мережі безпілотних літальних апаратів можуть спільно працювати, надаючи більше можливостей для забезпечення покращеного зв'язку та розвитку нових застосувань у різних сферах. Такі інновації можуть покращити якість обслуговування, зменшити затримки та сприяти покращенню підключення до мережі для різних сценаріїв використання. Проте, важливо також враховувати питання безпеки та приватності, пов'язані з використанням БПЛА та збором даних у високою області. Для успішної реалізації цих технологій потрібно вирішити багато технічних та регуляторних викликів [8].

Різні архітектурні підходи для організації мереж БПЛА демонструють різні способи взаємодії між літаючим і наземним сегментами мережі. Кожен з цих підходів має свої переваги і недоліки, і вибір конкретної архітектури може залежати від конкретних вимог і обставин в конкретному застосуванні: централізована архітектура, архітектура кластеризації, стільникова архітектура. Вибір конкретної архітектури залежатиме від конкретних вимог і обмежень запланованого проекту. Для забезпечення надійності та ефективності мереж БПЛА важливо також враховувати можливості автоматизації, адаптації до змінних умов, розподілу ресурсів та забезпечення безпеки мережі.

Аналіз застосування концепції програмно-конфігурованих мереж (SDN) для мереж БПЛА відображає потенціал цієї технології у розвитку та управлінні мережами БПЛА. Переваги використання SDN в мережах БПЛА: гнучкість і динамічність; вдосконалення якості обслуговування (QoS); скорочення часу реакції; забезпечення безпеки мережі. Загалом, SDN може значно поліпшити управління та ефективність мереж БПЛА, але вимагає детального проектування, врахування специфічних вимог і обмежень цих мереж, а також вирішення викликів.

Запропонований спосіб організації мережі БПЛА для збирання даних із сенсорних полів за використання технології SDN має потенціал для ефективного управління і збору інформації в умовах розподіленої мережі БПЛА та різної щільності сенсорних полів. Основні аспекти цього підходу варто розглянути більш детально: використання стаціонарних прив'язних БПЛА як контролерів SDN; розподілена структура мережі; вибір прив'язних БПЛА; управління потоками даних; маршрутизація БПЛА. Такий підхід має потенціал для оптимізації збору даних з сенсорних полів за допомогою мереж БПЛА та використання технології SDN для ефективного управління мережею. Однак варто враховувати, що розгортання такої системи вимагає детального проектування та урахування різноманітних факторів, включаючи фізичні обмеження БПЛА, споживання енергії та надійність зв'язку [9].

Описаний спосіб організації мережі БПЛА для збору даних із сенсорних полів застосовує алгоритми k-середніх та FOREL для формування кластерів БПЛА та визначення маршруту руху груп БПЛА. Розглянемо ці алгоритми та їх використання. Алгоритм k-середніх (k-means) є ефективним методом для розділення об'єктів (БПЛА) на групи (кластери) на основі схожості їхніх характеристик. Зокрема використовуємо його для формування кластерів БПЛА в мережі. Перед виконанням алгоритму, потрібно визначити кількість кластерів, на які буде розділена мережа. Це може вимагати аналізу щільності БПЛА та властивостей сенсорних полів. Після визначення кількості кластерів, алгоритм k-середніх обчислює центри кластерів таким чином, щоб вони були представниками групи БПЛА, що належать до кожного кластера.

Алгоритм FOREL (Fuzzy RELation) допомагає визначити радіуси кластерів. Ці радіуси можна використовувати для визначення територій, які обслуговуються групами БПЛА. Центри кластерів, які були визначені алгоритмом k-середніх, можуть використовуватися як точки руху груп БПЛА.

Кожна група БПЛА може обслуговувати територію, яка відповідає центру її кластера. Групи БПЛА можуть вибирати оптимальний маршрут руху на основі центрів кластерів та радіусів кластерів. Оптимальний маршрут може включати в себе обхід сенсорних полів, щоб ефективно зібрати дані. Важливо відзначити, що визначення кількості кластерів і радіусів кластерів є ключовими кроками, і їх вибір повинен бути обґрунтованим на основі конкретних умов і потреб вашої мережі БПЛА. Такий підхід до організації мережі дозволяє ефективно збирати дані з сенсорних полів за допомогою груп БПЛА та використовувати алгоритми кластеризації та визначення маршруту для оптимізації збору даних [10]. Алгоритм k-середніх показано на рисунку 3.

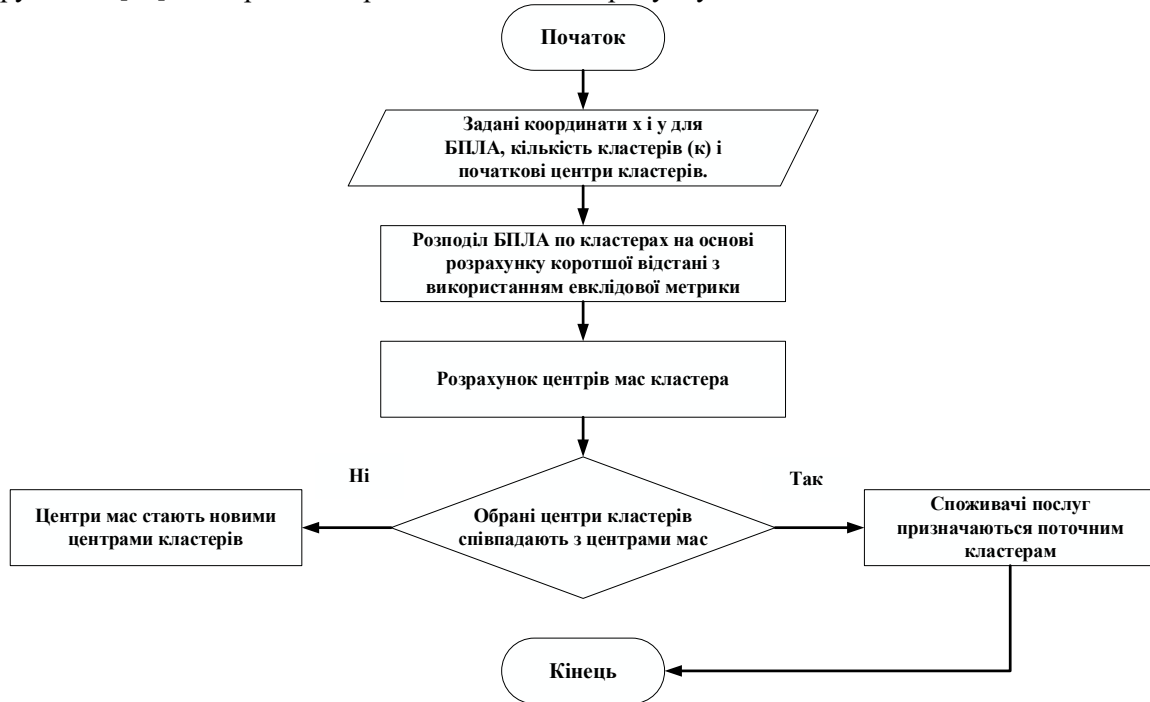


Рисунок 3 – Алгоритм k-середніх для БПЛА

Послідовність дій для мережі БПЛА з інтеграцією технологій SDN охоплює важливі аспекти організації мережі для збору даних з сенсорних полів. Однак, для покращення розуміння та реалізації цих кроків, важливо врахувати деякі подробиці та додати можливі перевірки і регулювання для оптимізації роботи мережі. Отже, послідовність виконання алгоритму: формування кластерів БПЛА з використанням алгоритму кластеризації k-середніх; початковий вибір головного вузла в кожному кластері; визначення області збору інформації для кожного кластера БПЛА; визначення маршруту руху для кожного кластера з використанням алгоритму FOREL; передача даних мережею БПЛА. Така послідовність дій враховує роботу мережі БПЛА в умовах змінюваної ситуації та взаємодії між різними частинами мережі. Доцільно також реалізувати механізми для вирішення можливих проблем, таких як втрати зв'язку чи виходження з ладу БПЛА [11].

Використання БПЛА для реалізації мобільних граничних обчислень може значно поліпшити продуктивність та ефективність обчислень IoT-пристроїв та зменшити затримки у передачі даних до центральних серверів. Воно може забезпечити важливу підтримку для обробки даних у реальному часі та забезпечити надійний обмін даними між пристроями IoT та центральними обчислювальними ресурсами. Можливості обчислення на основі MEC (Mobile Edge Computing) на базі БПЛА включають в себе обробку даних, розподіл обчислень, а також можливість взаємодії з іншими обчислювальними вузлами. Ця технологія має потенціал вдосконалити обчислювальні мережі IoT і забезпечити швидку та ефективну передачу даних для подальшого аналізу і прийняття рішень [1, 3].

Дослідження та алгоритми, пов'язані з інтеграцією БПЛА та мереж мобільного обчислення (MEC). Ці дослідження вирішують важливі завдання оптимізації та вдосконалення взаємодії між БПЛА та MEC для підтримки обчислень і передачі даних, забезпечення ефективної обробки даних і обчислень в реальному часі. Їх результати можуть бути важливими для подальшого розвитку мереж безпілотних літальних апаратів та мобільного обчислення в контексті Інтернету речей (IoT) та інших додатків.

У разі граничних хмарних обчислень на віддаленому сервері, коли обчислювальне завдання і

вузлів IoT (наземних датчиків) передаватиметься на граничний хмарний сервер через БПЛА-ретранслятор і там буде оброблятися, затримку передачі від БПЛА-ретранслятора на граничний хмарний сервер обчислювальної задачі і вузла IoT (наземні датчики) можна виразити як:

$$T_{UAV-server}^{trans} = \frac{S_i}{D_{UAV}} \quad (3)$$

Затримка передачі обчислювального завдання і від вузла IoT (наземні датчики) до граничного хмарного сервера може бути виражена як:

$$T_{server}^{process} = \frac{C_i}{F_{server}} \quad (4)$$

де F_{server} - обчислювальні можливості граничного хмарного сервера.

Отже, загальна тривалість передачі інформації для граничного хмарного сервера та тривалості обробки становитиме на основі підсумовування (3) та (4):

$$T_{server}^{total} = T_{IoT-UAV}^{trans} + T_{UAV-server}^{trans} + T_{server}^{process} \quad (5)$$

$$T_{server}^{total} = \frac{S_i}{D_{IoT}} + \frac{S_i}{D_{UAV}} + \frac{C_i}{F_{server}} \quad (6)$$

Загальну тривалість з урахуванням використання літаючого сегмента можна визначити таким чином:

$$T_i^{total} = \alpha T_{UAV-MEC}^{total} + (1 - \alpha) T_{server}^{total} \quad (7)$$

Моделювання було виконано з використанням пакета програм Matlab. Вихідні дані для моделювання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість задач N	15
Об'єм даних S_i	10–30 MB
CPU цикли C_i	1900 Cycle/s
Тривалість $T_i^{constraint}$	0,002 s
Швидкість передачі даних D_{IoT}, D_{UAV}	3–9 Mbps
Частота процесора UAV-МЕС (F_{UAV})	500 MHz
Частота процесора сервера граничних розрахунків (F_{server})	10 GHz

Число завдань встановлено рівним $N = 15$, а число IoT вузлів (наземних датчиків) - 5. Частоти процесорів БПЛА-МЕС і сервера граничних обчислень становлять 500 МГц і 10 ГГц відповідно. Обсяг даних випадковим чином збільшується з 10 до 30 мегабайт. Залежно від відстані швидкість передачі даних також змінювалася випадковим чином від 3 до 9 Мбіт/с, що означає, що на коротших відстанях досяжна більша швидкість передачі. Відповідно, для зменшення затримки виконання обчислювального завдання необхідно збільшити або обчислювальну потужність БПЛА- МЕС, або збільшити кількість БПЛА- МЕС. Дослідження і результати розвитку мереж БПЛА з інтеграцією технологій програмно-конфігурованих мереж (SDN), граничних обчислень і мереж мобільного обчислення (МЕС) передбачають: спільне використання технологій; архітектурний підхід для побудови мережі, де програмно-конфігуровані мережі повністю реалізовані на БПЛА; методи кластеризації для побудови кластерів БПЛА для організації та управління мережею БПЛА; методи вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА, що може підвищити ефективність передачі даних та зменшити затримки; алгоритм динамічного програмування є інноваційним підходом для вибору оптимального розміру групи БПЛА; оптимізація затримок і енергоспоживання, що робить їх практично важливими для реалізації в сучасних мережах БПЛА. Загалом, робота важлива для подальшого розвитку і вдосконалення мереж БПЛА та їх інтеграції з іншими технологіями. Методи і підходи можуть мати значущий вплив на розвиток дієвих та продуктивних систем мобільного обчислення з використанням БПЛА.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналіз можливостей інтеграції БПЛА і наземних мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь свідчить про великий потенціал цієї інтеграції. Основні переваги такої інтеграції дозволяють покращити якість зв'язку та забезпечити більш гнучку та ефективну мережу. Інтеграція БПЛА в мережу зв'язку стає все більш актуальною і

важливою, особливо у сучасних умовах, коли зростає попит на бездротові послуги в різних сценаріях застосування. Ця інтеграція відкриває нові можливості для покращення зв'язку та розширення функціональності мереж зв'язку п'ятого покоління та наступних.

Загалом, інтеграція SDN з мережами БПЛА відкриває нові можливості для поліпшення функціональності, продуктивності і розгортання цих мереж. Переваги програмованості і гнучкості SDN можуть бути використані для ефективного управління та оптимізації ресурсів у мережах БПЛА, що стає все важливішим у сучасному світі автономних систем.

Виконане дослідження має важливі наукові та практичні висновки щодо моделювання та аналізу трафіку в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь. Основні результати дослідження стосуються властивостей трафіку та його впливу на якість обслуговування в таких мережах. Зокрема, запропоновано модель трафіку, яка об'єднує трафік Інтернету речей, тактильного Інтернету та доповненої реальності. Ця модель дозволяє враховувати різні характеристики цих видів трафіку, включаючи ймовірність втрати пакетів та самоподібність потоку з параметром Херста $H = 0,7$. Розглянута модель дозволяє оцінити якість обслуговування не лише окремих типів трафіку, але і їх комбінацію. При цьому, визначено вплив властивостей об'єднаного потоку трафіку на його якість обслуговування, зокрема, на ймовірність втрати пакетів та затримку доставки. Отримані результати показали, що інтенсивність навантаження впливає на якість обслуговування. Збільшення навантаження може призвести до більшої ймовірності втрати пакетів, а зменшення - до домінування властивостей вхідного потоку.

Гетерогенний характер трафіку в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь вказує на необхідність використання різних ресурсів, включаючи БПЛА, для забезпечення якості обслуговування та сприятливого сприйняття користувачами. Здійснено важливий внесок у розуміння трафіку та його впливу на мережі зв'язку майбутніх поколінь. Отримані результати можуть бути корисними для планування та оптимізації таких мереж, а також для визначення стратегій обслуговування трафіку різних типів у цих мережах.

Список бібліографічного опису

1. Cui, Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G⁺ Requirements, Architectures and Challenges. China Telecommunications, 2022, v.19, issue 2, pp. 90-108.
2. Qiu, Junfei. Radio Resource Management for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Wireless Communications and Networking. Diss. University of York, 2021.
3. Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and L. Hanzo, "UAV-aided two-way multi-user relaying," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 1, 2021., pp. 246–260.
4. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes," IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 4, 2020., pp. 849–852.
5. X. Xi, X. Cao, P. Yang, J. Chen, T. Q. Quek, and D. Wu, "Network resource allocation for eMBB payload and URLLC control information communication multiplexing in a multi-UAV relay network," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 3, 2020., pp. 1802–1817.
6. Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, "UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 12, 2020., pp. 2088–2092.
7. B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, "Secrecy performance analysis of UAV assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 7, 2020., pp. 7404–7415.
8. J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, "Cache-enabled unmanned aerial vehicles for cooperative cognitive radio networks," IEEE Wireless Communications, vol. 27, no. 2, 2020., pp. 155–161.
9. Y. Zhang, T. T. Liu, H. G. Zhang, and Y. A. Liu, "LEACH-R: LEACH relay with cache strategy for mobile robot swarms," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 2, 2021., pp. 406–410.
10. J. Shi, L. Zhao, X. Wang, W. Zhao, A. Hawbani, and M. Huang, "A novel deep Qlearning based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 7, 2021., pp. 4348–4358.
11. Navarro-Ortiz, J. A survey on 5G usage scenarios and traffic models / J. Navarro-Ortiz, Pablo Romero-Díaz, Sandra Sendra et al.) // IEEE Communications Surveys & Tutorials 22.2. № 1-1. – 2020. – P. 905-929.

References

1. Cui, Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G⁺ Requirements, Architectures and Challenges. China Telecommunications, 2022, v.19, issue 2, pp.90-108.
2. Qiu, Junfei. Radio Resource Management for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Wireless Communications and Networking. Diss. University of York, 2021.
3. Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and L. Hanzo, "UAV-aided two-way multi-user relaying," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 1, 2021., pp. 246–260.
4. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes," IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 4, 2020., pp. 849–852.
5. X. Xi, X. Cao, P. Yang, J. Chen, T. Q. Quek, and D. Wu, "Network resource allocation for eMBB payload and URLLC control information communication multiplexing in a multi-UAV relay network," IEEE Transactions on

Communications, vol. 69, no. 3, 2020., pp. 1802–1817.

6. Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, "UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 12, 2020., pp. 2088–2092,

7. B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, "Secrecy performance analysis of UAV assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, 2020., pp. 7404–7415.

8. J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, "Cache-enabled unmanned aerial vehicles for cooperative cognitive radio networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, 2020., pp. 155–161.

9. Y. Zhang, T. T. Liu, H. G. Zhang, and Y. A. Liu, "LEACH-R: LEACH relay with cache strategy for mobile robot swarms," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 2, 2021., pp. 406–410.

10. J. Shi, L. Zhao, X. Wang, W. Zhao, A. Hawbani, and M. Huang, "A novel deep Qlearning based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 7, 2021., pp. 4348–4358.

11. Navarro-Ortiz, J. A survey on 5G usage scenarios and traffic models / J. Navarro-Ortiz, Pablo Romero-Díaz, Sandra Sendra et al.) // *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2. № 1-1. – 2020. – P. 905-929.