

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **«МЕТОДИ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІТАЮЧИХ АПАРАТІВ
ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗВ'ЯЗКУ В МЕРЕЖІ 5G»**

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Михайленко О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник _____

Руденко Н. В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____

(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

ВСТУП

Актуальність дослідження. Очікується, що ландшафт майбутнього п'ятого покоління радіодоступу буде безперешкодно і повсюдно підключати все і підтримувати як мінімум 1000-кратні обсяги трафіку, 100 мільярдів підключених безпроводових пристроїв і різноманітні вимоги до надійності, затримки, терміну придатності батареї, і т.д., на відміну від нинішніх стільникових мереж четвертого покоління (4G). В даний час популярність Інтернету речей (IoT) викликала різке зростання трафіку мобільних даних для майбутніх безпроводових мереж 5G. Відповідно до останнього звіту, глобальний мобільний трафік досягне 1 зеттабайт в місяць до 2028 року. Це призведе до того, що існуюча інфраструктура зіткнеться з високими вимогами до пропускної здатності, а також накладе важкий тягар на операторів зв'язку з точки зору збільшення капіталовкладень і експлуатаційних витрат. Деякі ранні зусилля були присвячені гетерогенним мереж HetNets для задоволення цих зростаючих потреб.

Однак в непередбачених або надзвичайних ситуаціях (наприклад, при наданні допомоги при стихійних лихах і відновленні послуг) розгортання наземних інфраструктур є економічно не вигідним і складним через високі експлуатаційні витрати та складні і нестабільні умови середовища. Для вирішення цієї проблеми інтелектуальна гетерогенна архітектура, яка використовує безпілотні літальні апарати (БПЛА), розглядалася як багатообіцяюча нова парадигма, яка спростить три сценарії центрального використання майбутніх безпроводових мереж:

- розширений мобільний широкополосний зв'язок (eMBB)
- наднадійний зв'язок з малою затримкою (URLLC)
- масивний зв'язок машинного типу (mMTC).

Метою роботи є підняття такого питання, як розширення спектру можливих схем побудови стільникових мереж типу 5G за допомогою літаючих апаратів типу БПЛА та використання даного типу літаючих апаратів в якості оперативного засобу розгортання мережі в разі масових заходів чи стихійного лиха.

Ступінь наукової розробки. Проблемі використання літаючих апаратів для побудови стільникових мереж, на кшталт 5G присвячено праці багатьох вчених, одні з них Бін Лі та Цзесон Фей. В цілому, всі роботи науковців направлені саме на розробку принципів та методів використання літаючих апаратів типу БПЛА для побудови стільникових мереж на кшталт 5G. В цих же роботах описано проблематику енергоефективності такого рішення як БПЛА-БС.

Такі науковці як Йонг Зенг та Руї Жанг досліджували метод NOMA в системах стільникового зв'язку 5-го покоління. Також в їх роботах піднімалось питання про використання MIMO при побудові безпроводових мобільних мереж за допомогою дронів.

Об'єкт дослідження - процес обміну даними між БПЛА та 5G-мережами.

Предмет дослідження - методи застосування БПЛА для організації зв'язку 5G міліметрового діапазону.

Мета роботи - аналіз використання літаючих апаратів типу БПЛА в організації зв'язку в мережі 5G в умовах високого навантаження трафіку.

Методи дослідження - для розробки магістерської роботи використовувався теоретичний метод аналізу даних з відкритих джерел з подальшою їх структуризацією.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у тому, що БПЛА може грати центральну роль в забезпеченні відновлення мережевих послуг в постраждалому від стихійного лиха регіоні, підвищуючи ефективність мереж громадської безпеки, або управлінні іншими надзвичайними ситуаціями, коли потрібен URLLC. Зокрема, eMBB за допомогою БПЛА можна розглядати як важливе доповнення до стільникових мереж 5G.

Апробація. На основі дослідження підготовлено тези доповідей:

1. «Використання технології NOMA для розгортання мережі 5g на базі БПЛА»;

2. «Використання пз “Grafana” для моніторингу та аналізу даних».

Для інтернет-конференції «Науково-практична конференція «Проблеми

комп'ютерної інженерії»»

1 ЛІТАЮЧИЙ АПАРАТ ТИПУ БПЛА

1.1 Характеристики БПЛА

Безпілотний літаючий апарат (БПЛА) (або безпілотний літальний апарат, широко відомий як дрон) - це літаючий апарат без пілота-людини на борту. БЛА є складовою частиною безпілотної авіаційної системи; які включають БПЛА, наземний контролер і систему зв'язку між ними. Політ БПЛА може здійснюватися з різним ступенем автономності: або під дистанційним управлінням людиною-оператором, або автономно за допомогою бортових комп'ютерів.[1]

Безпілотні літаючі апарати важко класифікувати, так як вони мають дуже різні характеристики. Це різноманітність походить від великої кількості конфігурацій і компонентів БПЛА. В результаті сьогодні відсутні вимоги з боку авіаційних регуляторів про те, як БПЛА повинен бути оснащений.

Безпілотники нагадують вертоліт з 4 винтами. Вони відрізняються габаритами, функціональністю, дальністю польотів, рівнем автономності та іншими характеристиками.

Умовно всі дрони можна поділити на 4 групи:

- Мікро. Такі БПЛА важать менше 10 кг, максимальний час перебування в повітрі - 60 хвилин. Висота польоту - 1 кілометр.
- Міні. Вага цих апаратів досягає 50 кг, час перебування в повітрі досягає 5 годин. Висота польоту варіюється від 3 до 5 кілометрів.
- Міді. Безпілотні літальні апарати вагою до 1 тонни, розраховані на 15 годин польоту. Такі БПЛА піднімаються на висоту до 10 кілометрів.
- Важкі безпілотники. Їх вага перевищує тону, розроблені апарати для далеких польотів тривалістю більше доби. Можуть переміщатися на висоті 20 кілометрів.

У конструкції безпілотного апарату є супутниковий навігатор і програмований модуль. Якщо БПЛА використовується для отримання,

збереження і передачі інформації на пульт оператора, в ньому додатково встановлюються карта пам'яті і передавач.

Конструкція і функціональність змінюються в залежності від призначення апарату. Є моделі дронів, які вмiють приймати команди людини і реагувати на них. У таких пристроях встановлені спеціальні модулі-приймачі команд.

Також дрони можна класифікувати:

- по дизайну / конфігурації;
- за типом зльоту;
- за цільовим призначенням;
- за технічними характеристиками;
- за типом живлення силової установки;
- по системі запобігання зіткнень;
- за типом навігації.

1.2 Різновиди літаючих апаратів типу БПЛА

Перший тип БПЛА має нерухоме крилом, його поверхня створює підйомну силу. Завдяки жорсткому крилу безпілотник володіє характеристиками глайдера і більш стійкий до помилок пілотування або технічних несправностей. БПЛА з нерухомим крилом також можуть нести на собі більше обладнання на великі відстані з меншою витратою енергії(Рис 1.1).



Рис. 1.1 БПЛА з нерухомим крилом

Завдяки всім згаданим можливостям даний тип БПЛА відмінно підходить для доставки невеликих вантажів або для виконання більш тривалих місій. Але для місій, що вимагають високої точності, слід вибрати інший тип дронів. Адже БПЛА з нерухомим крилом не можуть зависати над одним місцем і, відповідно, не можуть забезпечити точної позиції камери [2]

Другий тип -- гвинтокрилий БПЛА. це безпілотний літальний апарат, політ якого, головним чином, здійснюється за рахунок підйомної сили, створюваної несучими гвинтами. Основна перевага даного типу дронів - це можливість вертикального зльоту і посадки. Це дозволяє використовувати БПЛА в менш великих просторах.

Можливість зависнути і маневрувати дозволяє даному типу БПЛА виконувати високоточні місії, наприклад Інспекції залізниці, трубопроводів, електромереж, мостів та ін. Але з іншого боку, гвинтокрилі БПЛА вимагають більшої уваги з точки зору техобслуговування і ремонту.[3]

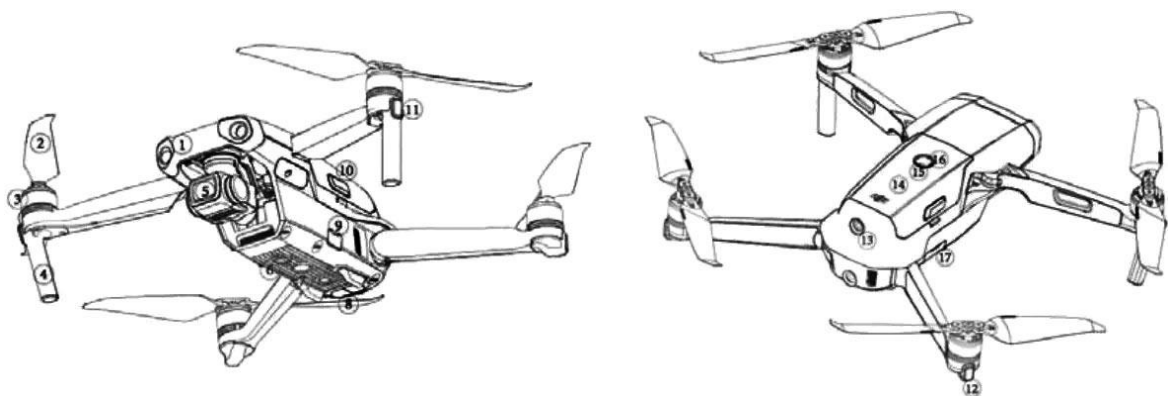


Рис. 1.2. Гвинтокрилий БПЛА

Третій тип – прив'язані дрони. Використання так званих «прив'язаних дронів» Flying COWs (Cell on Wings), до яких по міцному, але дуже легкому кабелю подається електрична напруга з наземної станції, що дозволяє утримувати їх в повітрі на заданій висоті і в заданому місці практично необмежений час, дозволяє вирішити завдання локального стільникового покриття на будь-якій території. Крім того, по кабелю проводиться підключення МБС до ШПД-каналу

на землі, що дозволяє використовувати в рішенні стандартне серійне обладнання типу фемтосот і репітерів / бустерів. На рисунку 1.3 зображено саме такий тип БПЛА.



Рис. 1.3 “Прив’язаний” БПЛА

На основі аналізу світових тенденцій можна виділити наступні варіанти розширень телекомунікаційних мереж стільникових операторів з використанням дронів:

- використання прив'язаних дронів
- використання дронів для ретрансляції послуг на територіях, не покритих мережами зв'язку;
- розгортання послуг зв'язку на базі угруповань атмосферних супутників.

Основою надання телеком-послуг на базі дронів стають мініатюрні МБС стандарту LTE (5G), які дозволяють забезпечувати стільниковий зв'язок та Інтернет в місцях, де доступ до мережі обмежений або сигнал мережі низької якості, а також у віддалених районах і на спеціальних заходах.

Четвертий і останній різновид БПЛА -- атмосферні супутники. Вони можуть використовуватися як в якості одиничних дронів, що ретранслюють сигнал в

прив'язці до конкретної місцевості, так і у вигляді цілого угруповання з десятків, сотень і навіть тисяч АС, що покривають радіосигналом окремі райони, країни і цілі регіони. [4] Як систем зв'язку і передачі можуть використовуватися радіо- або оптична зв'язок. Зображено на Рис 1.4.



Рис. 1.4 Атмосферний супутник, як різновид БПЛА від NASA

2 МЕТОДИ ТА СХЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІТАЮЧИХ АПАРАТІВ ТИПУ БПЛА ДЛЯ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ

2.1 Концепція інтегрованої мережі космос-повітря-земля з застосуванням БПЛА

Щоб пристосувати різноманітні послуги IoT з різними вимогами до якості обслуговування (QoS) в різних практичних сценаріях (наприклад, міські, сільські та малонаселені райони), необхідно використовувати конкретні переваги кожної мережевої парадигми. Наприклад, щільно розгорнуті наземні мережі в міських районах можуть підтримувати доступ з високою швидкістю передачі даних, системи супутникового зв'язку можуть забезпечувати широке охоплення і безперебійний зв'язок з найбільш віддаленими і малонаселеними районами, а зв'язок з БПЛА може допомогти існуючому стільниковому зв'язку для швидкого відновлення послуг і запропонувати рентабельне рішення для розвантаження багатолюдних районів. В даний час широко поширена думка, що індивідуально існуюча мережа не може задовольнити потребу в обробці величезних обсягів даних і виконанні важливих додатків, таких як Інтернет речей, хмарні обчислення і великі дані. Тому серед наукових співтовариств зростає попит на розробку інтегрованої мережевої архітектури з космічної мережі, повітряної мережі і наземної мережі.

Загальна архітектура інтегрованої мережі космос-повітря-земля представлена на рис. 2.1. для надання призначеним для користувача пристроїв поліпшених і гнучких наскрізних послуг, які поділяються на три сегменти: космічний, повітряний і наземний рівні. Таким чином, БПЛА використовуються для створення багаторівневої мережі БПЛА, а також інфраструктури радіодоступу, мобільних користувачів і транспортних засобів, що утворюють наземну мережу. У той же час програмно визначаються мережеві контролери (SDN), що можуть бути розгорнуті для регулювання поведінки мережі та управління мережевими ресурсами для полегшення взаємодії космос-повітря-земля. Беручи до уваги різні сегменти, які мають відмінні характеристики, такі як стандарти зв'язку і різні

мережеві пристрої з різними функціями, інтерфейси управління і зв'язку контролерів SDN для кожного сегмента повинні бути виділені відповідного сегменту.

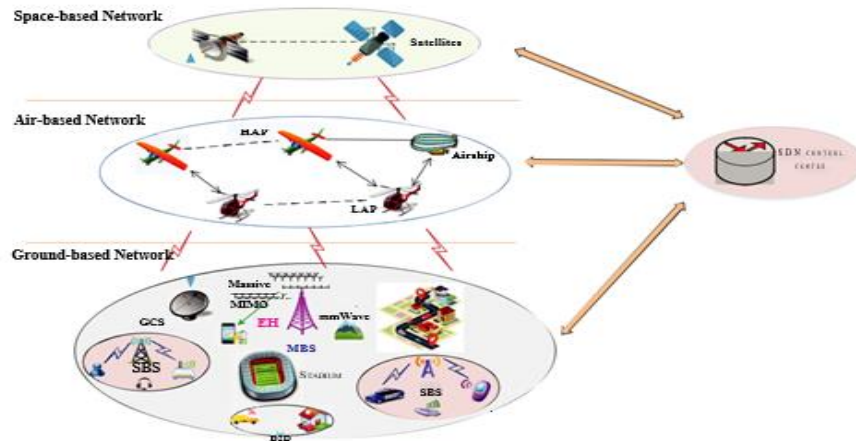


Рис. 2.1. Ілюстрація інтегрованих мереж космос-повітря-земля.

Концептуальна архітектура зв'язку в мережах з БПЛА складається з трьох рівнів: космічний рівень для супутникових каналів передачі даних, повітряний рівень для БПЛА і каналів передачі даних LoS і наземний рівень для пристроїв кінцевих користувачів, GCS, уряд / центр безпеки.

Що стосується космічної мережі, то вона складається з ряду або групи супутників на різних орбітах (таких як геостаціонарна навколоземна орбіта (35786 км), низька навколоземна орбіта (700-2000 км) і середня навколоземна орбіта (8000-20000 км)), наземні станції і центри управління роботою мережі. Супутники на різних орбітах, різних типів і властивостей можуть утворювати глобальну космічну мережу через міжсупутникові канали, які, в свою чергу, використовують методи багатоадресної та ширококомовної передачі для підвищення пропускної здатності мережі. Тим часом, шляхом встановлення каналів зв'язку супутник-БПЛА і супутник-земля створюються з'єднання з сусідніми супутниками і наземними стільниковими мережами. [5]

Виходячи з цього, космічна мережа може забезпечити глобальне покриття на Землі послугами аварійно-рятувальних служб, навігації, спостереження Землі та зв'язку / ретрансляції. Ми можемо уявити собі, що Земля майбутнього буде

оточена великою кількістю супутників. Однак на передачу даних між супутниками і наземним сегментом впливають великі затримки передачі через великі втрати на трасі в вільному просторі та тропосферне загасання. Для надання послуг з малою затримкою та високою пропускнуою здатністю, таких як діапазон С і діапазон Ка, необхідно використовувати більш високу смугу частот.

Зв'язок між супутниками і БПЛА – ключовий компонент побудови єдиної мережі космос-повітря-земля. Варто зазначити, що канал супутник-БПЛА в основному залежить від лінії прямої видимості, а також значно страждає від ослаблення під час дощу при використанні діапазону Ка і вище. Завдяки своїм додаткам і устаткуванням БПЛА може зв'язуватися з супутниками на різних орбітах під час навігації БПЛА. Як правило, геосинхронний супутник використовується для зв'язку між супутником і БПЛА, оскільки його розташування відносно Землі залишається незмінним.

Для лінії зв'язку БПЛА із супутником передумовою встановлення успішного з'єднання є вирівнювання просторового променя від БПЛА на цільовий супутник. Проте, безперервна навігація БПЛА призведе до постійної зміни орієнтації, що безпосередньо впливає на просторове наведення променя для лінії зв'язку БПЛА із супутником. Один з типових сценаріїв - це супутниковий зв'язок за допомогою БПЛА, коли БПЛА необхідно постійно налаштовувати свій промінь на цільовий супутник для підтримки лінії зв'язку. [5]

У мережі повітряного базування широкий спектр безпілотних літаючих платформ, включаючи БПЛА, дирижаблі або повітряні кулі, може бути обмежений різними робочими висотами через обмеження SWAP. Як правило, БПЛА оснащується прийомопередавачами для забезпечення гнучкого доступу в Інтернет для групи наземних користувачів, а дрон-сота є відповідною зоною покриття. Розмір дрона-соти багато в чому залежить від висоти, розташування, потужності передачі і факторів навколишнього середовища БПЛА. Крім того, рій БПЛА з'єднується шляхом встановлення каналів зв'язку БПЛА з БПЛА для спільного надання послуг. Багаторівнева мережа БПЛА не тільки підтримує обмін керуючими повідомленнями між БПЛА для запобігання зіткнень і розрахунку

траєкторій польоту, але також відправляє дані на мобільні пристрої, які звертаються до них. Конкретні БПЛА оснащені різноманітними радіоінтерфейсами, такими як LTE або WiFi, для зв'язку з інфраструктурою або супутниками, яка встановлює шлюзи між багаторівневими мережами БПЛА та іншими мережами. БПЛА може або використовувати повітряну лінію зв'язку з супутниками, або підключатися до наземної системи через транзитну лінію зв'язку.

У наземній мережі гетерогенна мережа радіодоступу, що складається з макростільників і малих сот, обслуговує мобільних користувачів, таких як мобільні телефони, безпілотні автомобілі, пристрої IoT і т.д., що створює співіснуючу систему проривних технологій для безпроводових мереж 5G. Це охоплює всі перспективні стільникові технології 5G, включаючи діапазон частот міліметрового діапазону, збір енергії, передачу NOMA і зв'язок D2D, як показано на рисунку 2.1, що останнім часом стало важливою темою досліджень. Крім того, експоненціально зростаючі обчислювальні можливості мобільних пристроїв можуть бути задумані для мобільних периферійних обчислень (MEC), де БПЛА можуть планувати обчислювальні завдання, в той час як бортові комп'ютери виконують ці завдання.

Також популярний контент можна кешувати на БПЛА або наземних пристроях, і передавати через дрони-соти або D2D-зв'язок між кінцевими пристроями. Зокрема, існує два типи каналів передачі при інтеграції повітряної мережі і наземної мережі: канал передачі даних LoS і канал супутникової передачі даних. [5] Канал передачі даних LoS використовується для прямої передачі від БПЛА до наземної станції управління (GCS), в якій радіо випромінювання поширюються прямою лінією. При такому способі передачі хвилі можуть легко поглинатися перешкодами, тому він не підходить для військових полів. [5]

У цій роботі була розглянута загальна інтегрована мережева архітектура B5G. Він описує взаємозв'язок між різними технологіями, що розвиваються. Концепція діапазону частот mmWave, збору енергії, передачі NOMA і зв'язку D2D також була включена в цю пропонувану архітектуру мережі 5G. Пропонована архітектура також пояснює ролі MEC і кешу. Загалом, запропонована інтегрована

мережева архітектура може надати хорошу платформу для майбутньої стандартизації мережі, яка, як очікується, буде надійною, ефективною і безпечною в реальному часі.

Хоча важливість інтегрованої мережі космос-повітря-земля в безпроводовому зв'язку 5G постійно зростає, розробка інтегрованої мережі є складним завданням, що включає в собі моделювання каналу повітря-земля, оптимальне розгортання, енергоефективність, траєкторію планування, управління ресурсами, безпеку мережі і т. д.

Моделювання каналів: через відмінність характеристик каналу повітряного сегменту (таких як тривимірний (3D) простір і мінливість у часі) канали зв'язку БПЛА з землею набагато складніше, ніж існуючих наземних каналів зв'язку.

Крім того, канали зв'язку БПЛА з землею більш схильні до блокування, ніж канали зв'язку "повітря-повітря", в яких переважає LoS. Тому традиційні моделі часто не підходять для опису каналів зв'язку БПЛА-Земля. З огляду на неоднорідне середовище, канали зв'язку БПЛА з землею в значній мірі залежать від висоти і типу БПЛА, кута місця і типу середовища поширення. Ясно, що точне моделювання каналу має життєво важливе значення для правильної оцінки продуктивності системи. Однак, пошук загальної моделі каналу зв'язку БПЛА-Земля з урахуванням таких факторів є складним завданням, яке вимагає всебічного моделювання і вимірювань в різних середовищах. В даний час було зроблено безліч кампаній по вимірюванню каналів і спроб моделювання для оцінки характеристик каналів БПЛА-Земля.[6]

Розгортання: Зв'язок БПЛА із супутником є ключовим компонентом для побудови інтегрованої мережі космос-повітря-земля, мобільність БПЛА і супутника ускладнює роботу інтегрованої мережі. З одного боку, характеристики каналів "повітря-земля" необхідно враховувати для оптимального тривимірного розгортання БПЛА для зменшення передачі обслуговування і запобігання фізичних зіткнень. З іншого боку, супутникова система обмежена потужністю і смугою пропускання через великі затримки передачі, а завмирання каналу супутник-земля на високих частотах (зазвичай в Ка-діапазоні) набагато більш

серйозні, що, вірогідно, блокує її практичне використання.

Планування шляху: для мережі повітряного базування, що включає рій БПЛА, кожен з яких має траєкторію польоту над землею. Щоб зменшити затримку зв'язку, БПЛА необхідно наближатися до наземних користувачів. Однак через необхідність підтримки зв'язку з сусідніми БПЛА, для даного БПЛА не завжди можливо підтримувати близьке з'єднання з обслуговуючим користувачем. Як наслідок, якщо йдеться про рій БПЛА, пошук оптимальної траєкторії польоту для БПЛА є складним завданням через практичні обмеження. Таким чином, необхідно використовувати метод динамічного управління траєкторією для безпілотних літальних апаратів, щоб збільшити ймовірність з'єднань між кінцевими лініями зв'язку при збереженні достатнього покриття всієї цільової області.

Експлуатаційна висота: через обмеження SWAP різні типи БПЛА можуть бути обмежені різною робочою висотою. Наприклад, для мобільних пристроїв в міських умовах може знадобитися більш високий ступінь підключення LoS, в той час як для мобільних пристроїв в сценаріях в передмісті може знадобитися більш високий ступінь зниження втрат на трасі. Зверніть увагу, що велика висота БПЛА сприяє більш високому рівню з'єднання по прямої видимості, оскільки відображення і затінення зменшуються, а менша висота забезпечує зниження втрат на трасі. Вибираючи різну висоту для багаторівневих БПЛА, можна знайти оптимальний компроміс між можливістю з'єднання LoS і втратами на шляху сигналу.

Динаміка інтерференції: в побудованих багаторівневих мережах Het-Nets наземна мережа і канал "повітря-земля" страждають від сильних міжканальних перешкод від одного і того ж або різних сегментів, що поступово зробить поточний радіоінтерфейс «забрудненим». Крім того, мобільність БПЛА створює доплерівське зміщення, яке також викликає серйозні перешкоди між несучими на високих частотах. Отже, з урахуванням характеристик мобільного зв'язку, відповідне управління перешкодами в інтегрованій мережі стає більш складним завданням. [6]

Обмежена кількість енергії: оскільки БПЛА в основному покладаються на акумуляторну батарею, тривалість польоту на БПЛА сильно залежить від енергоспоживання БПЛА, яке може залежати від їх мобільності і потужності прийому/передачі сигналу. Це основна проблема, яка значно обмежує час їх роботи. Відповідно, вкрай важливо продовжити термін служби або навіть забезпечити постійне обслуговування під час місії за допомогою передових технологій зарядки.

Транзитний стільниковий зв'язок. Важливою відмінністю наземних базових станцій від базових станцій БПЛА є той факт, що транспортна мережа характеризується гетерогенними лініями зв'язку. Зокрема, наземні BS зазвичай підключаються до базової мережі через провідні канали з великою пропускну здатністю. Навпаки, БПЛА-BS, що з'єднуються з макробазовими станціями (MBS) або базової мережею, потребують високопродуктивних безпроводових транзитних каналів. На практиці обмежені транзитні напрямки стануть вузьким місцем і вплинуть на QoS мобільних користувачів. [7]

Мережева безпека: оскільки інтегрована мережа створює багаторівневу топологію, в якій розгорнуто кілька вузлів з різними характеристиками і широкомовним середовищем безпроводового поширення LoS, інтегрована мережа особливо вразлива для зловмисних атак. В результаті стратегії або протоколи захисту мають першорядне значення. Крім того, ще одним відкритим питанням є точне позиціонування БПЛА і виявлення несанкціонованого вторгнення в повітряний простір. Крім того, контролери SDN в основному відповідають за управління ресурсами і контролем роботи мережі, тому захист контролерів SDN від різних кібератак як і раніше є проблемою в інтегрованих мережах.

Попит в реальному часі: супутники для різних завдань або послуг мають відповідну швидкість і покриття зв'язку, канали передачі даних між вузлами можуть мати часті перебої через високу частоту помилок по бітам і затримки передачі. Оскільки канал супутникової передачі даних використовує бортову супутникову систему передачі для передачі віддалених даних, проблема полягає в тому, як максимально збільшити швидкість збору даних і можливості обміну

інформацією в реальному часі при передачі даних на GCS.

На сьогоднішній день багато досліджень присвячених мережам зв'язку за допомогою БПЛА, особливо в організації тимчасового або допоміжного зв'язку. Завдяки функціональності портативного приймача і передовим технологіям обробки сигналів успішний зв'язок з БПЛА дозволяє реалізувати покриття і підтримувати масивні динамічні з'єднання. На рис. 2.2 показаний сценарій, в якому БПЛА діють як літаючі БС, Ці БПЛА зазвичай оснащені різними корисними навантаженнями для прийому, обробки і передачі сигналів, прагнучи доповнити вже існуючі стільникові системи, забезпечуючи додаткову ємність в гарячі точки під час військових подій. Цей сценарій був розглянутий як один з п'яти ключових сценаріїв, з якими зіткнуться майбутні стільникові мережі.

Крім того, БПЛА можна використовувати для посилення інфраструктури зв'язку в надзвичайних ситуаціях і в ситуаціях громадської безпеки, коли існуюча наземна мережа пошкоджена або не працює повністю. [7]

Для підвищення продуктивності системи зв'язку БПЛА в мережах 5G велике значення мають методи фізичного рівня, оскільки вони суттєво впливають на застосування БПЛА. На фізичному рівні в основному існує п'ять ключових технологій-кандидатів, а саме зв'язок в міліметровому діапазоні, передача NOMA, CR і збір енергії.

Важливо відзначити, що безпілотним літаючим апаратам, можливо, доведеться мати справу з різними типами даних, такими як голос, відео і величезні файли даних, що створює безпрецедентні проблеми з точки зору вимог до високої пропускної здатності. Цей очікуваний ріст поряд з накопиченням спектра стимулює перехід на нові розподілені частоти. У цьому контексті зв'язок в міліметровому діапазоні стає підходящим варіантом, який може використовувати переваги величезної кількості неліцензованих спектральних ресурсів в діапазоні частот міліметрового діапазону (понад 30-300 ГГц) для задоволення високих вимог до безпроводових мереж 5G. [8]

З точки зору забезпечення безпроводового мобільного доступу для стільникових мереж з використанням БПЛА в діапазоні міліметрових хвиль

безпосередньою проблемою є надзвичайно високі втрати при поширенні, оскільки Закон Фріїса говорить, що втрати на всепрямованому тракті у вільному просторі ростуть пропорційно квадрату несучої частоти. Проте, коротка довжина хвилі сигналів міліметрового діапазону дозволяє розмістити кілька антен в невеликому БПЛА. В якості побічного продукту можна використовувати метод формування променя для створення вузького спрямованого променя і подолання високих втрат на трасі або додаткових втрат, спричинених атмосферним поглинанням і розсіюванням.

Основна відмінність між мережею з використанням БПЛА в міліметровому діапазоні і звичайної мережею в міліметровому діапазоні з фіксованою базовою станцією полягає в тому, що БПЛА може переміщатися. Деякі з існуючих проблем загострюються через рух БПЛА. Наприклад, для фіксації руху БПЛА необхідні більш ефективно вивчення і відстеження формування променя, а канальний ефект Доплера вимагає додаткового розгляду, оскільки як положення БПЛА і виявлення користувача взаємопов'язані.

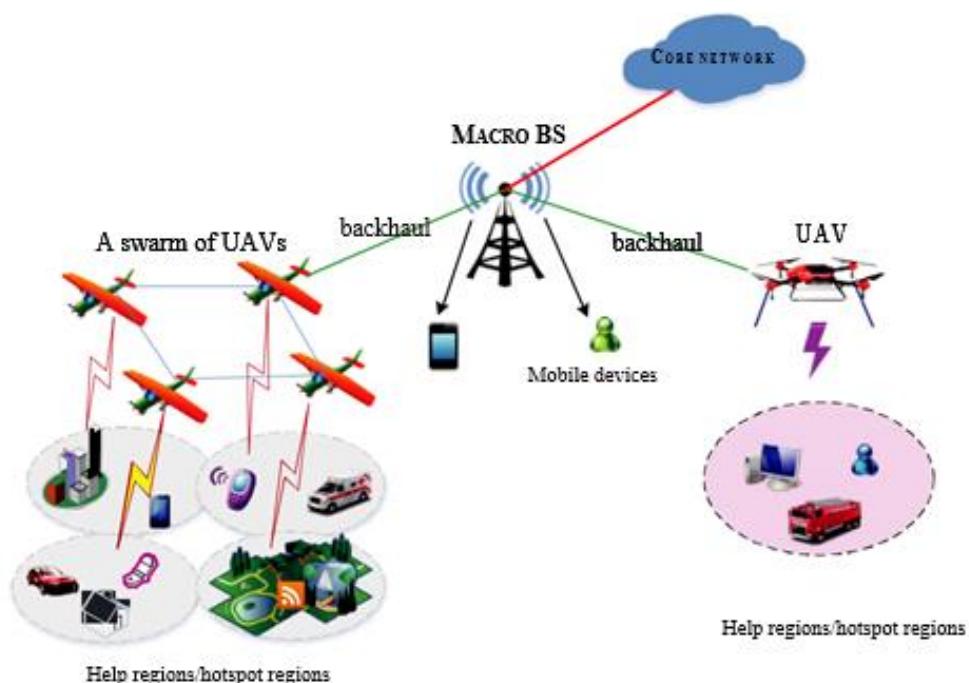


Рис. 2.2. Приблизний сценарій використання БПЛА в якості повітряних БС.

Дані літаючі апарати обслуговують цільову область, де кожен БПЛА обладнаний безпроводовими приймачами, що дозволяють їм спілкуватися з наземними

користувачами, а також з іншими БПЛА. [8]

Завдяки широкій смузі пропускання і короткій довжині хвилі, вперше було представлено концепцію мережі БПЛА mmWave разом з її характеристиками і вказав можливі рішення на майбутнє. Зокрема, було досліджено структуру ієрархічної кодової книги формування діаграми спрямованості для швидкого навчання та відстеження формування діаграми спрямованості, а також досліджували використання множинного доступу з просторовим розділенням mmWave для підвищення пропускної здатності мережі. Також було досліджено секретність випадково розгорнутої мережі зв'язку mmWave з підтримкою БПЛА по каналах з завмираннями Накагамі-м, де застосовувався точковий процес Matern' Hardcore для підтримки мінімальної безпечної відстані між випадково розгорнутими БПЛА-БП.

Щоб обійти ці перешкоди, створювані короткою довжиною хвилі, як згадувалося вище, в зв'язку з міліметровими хвилями широко необхідні БПЛА в якості мобільних реле. З цією метою Kong вивчали новий метод ретрансляції БПЛА, спеціалізований для зв'язку в міліметровому діапазоні, де БПЛА-ретранслятор використовувався для вимірювання якості лінії зв'язку в реальному часі, а місце розташування антени було спроектовано належним чином. Чисельні результати показали, що БПЛА-реле може забезпечити більш точні і ефективні рішення, ніж існуючий метод реле. Було запропоновано ефективний метод відстеження каналу для системи зв'язку МІМО БПЛА міліметрового діапазону, де система зв'язку і управління була задумана спільно, а тривимірна модель каналу була сформульована як функція інформації про стан руху БПЛА та інформації про посилення каналу.

Було розроблено багатодіапазонний HetNet з використанням БПЛА, що включає наземну макро-БС і дворезимну малу БС mmWave, та запропонували спільну схему розподілу піднесучої і потужності для максимального підвищення енергоефективності системи. Беручи до уваги блокування LoS людськими тілами, було вивчено ефективне розгортання БПЛА міліметрової хвилі-БП і отримано відповідну висоту і радіус чарунки. Також оцінено ефективність використання

методу ущільнення малих осередків в поєднанні з БПЛА, які працюють в частотному діапазоні міліметрових хвиль, і результати моделювання показали, що цей метод є багатообіцяючим рішенням для усунення обмежень поширення. На завершення всього виконано вимірювання поширення міліметрових хвиль повітря-земля для зв'язку БПЛА за допомогою моделювання трасування променів.

2.1.1 Передача NOMA БПЛА

NOMA останнім часом привертає значну увагу як одна з ключових технологій для систем зв'язку 5G, що досягає високої спектральної ефективності за рахунок включення суперпозиційного кодування в передавачі з послідовним придушенням перешкод (SIC) в приймачах. У порівнянні з ортогональними схемами множинного доступу (OMA) NOMA обслуговує безліч користувачів з різноманітними шаблонами трафіку неортогональним чином, з огляду на область потужності для множинного доступу. Це забезпечує ефективний шлях БПЛА для задоволення потреб великої кількості наземних користувачів на різних рівнях потужності. В основі реалізації NOMA лежить різниця в умовах каналу між користувачами. До сих пір безліч робіт сприяло впровадженню передачі NOMA для зв'язку за допомогою БПЛА, в якій БПЛА-БП можуть обслуговувати декількох користувачів, які працюють одночасно / на одній несучій частоті, особливо для екстрених служб з великою кількістю користувачів. [9]

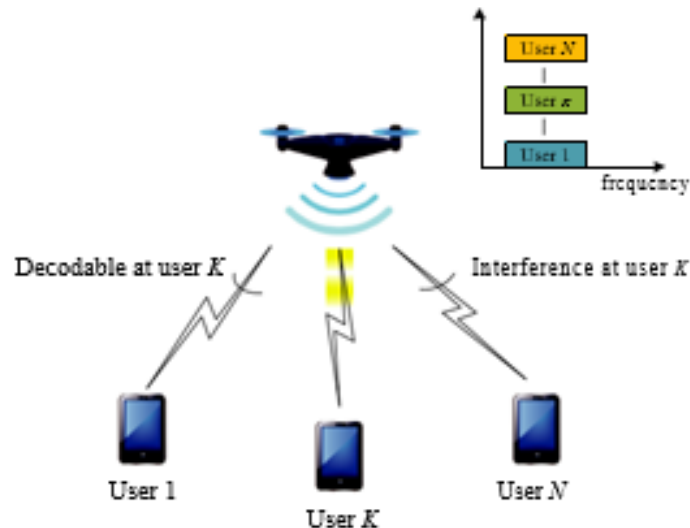


Рис. 2.3. Схема для розглянутого сценарію NOMA БПЛА.

БПЛА обслуговує декількох наземних користувачів, причому сигнали користувачів з 1 по $k-1$ придушуються у k -го користувача, а сигнали користувачів з $k+1$ по N приймаються як перешкоди.

Зокрема, для випадку NOMA з двома користувачами була зосереджена на пошуку оптимальної висоти вертолітного БПЛА-БП для забезпечення максимальної рівнозначності серед користувачів при обмеженні швидкості окремих користувачів і властиві переваги, досяжні NOMA, були продемонстровані над OMA. Розширюючи [1], автори далі сформулювали завдання сумарної швидкості як функцію розподілу потужності і висоти БПЛА в [9], і була запропонована методологія розширення зони дії з обмеженнями для знаходження оптимальної висоти. Було використано БПЛА з нерухомим крилом для обслуговування двох наземних користувачів з використанням передачі NOMA по низхідній лінії зв'язку, в якій була отримана ймовірність збою для обох наземних користувачів і обраний ефективний режим передачі, щоб гарантувати більшу ймовірність збою для досягнення справедливості для користувачів. Крім того, передача NOMA також застосовувалася до систем ретрансляції за допомогою БПЛА [10],

У разі багатокористувацького NOMA [11] представлено передачу NOMA на БПЛА-БС, що працює на частоті міліметрового діапазону на великому стадіоні, де

кілька користувачів обслуговувалися одночасно в одному промені, внаслідок чого була визначена оптимальна робоча висота, а також спосіб розподілу потужності для підвищення продуктивності сумарної швидкості відмов. З передачею mmWave-NOMA на UAV-BS відстеження і зворотна передача повної інформації про стан каналу стають обтяжливими, тому обмежені схеми зворотного зв'язку були розглянуті в [11] і [12] на основі доступності інформації про відстані користувача та інформації кута користувача під його запит. Чисельні результати показали, що запропонована схема зворотного зв'язку користувача на основі кута значно перевершує запропоновану схему зворотного зв'язку на основі відстані користувача. В роботі [12] використовували методичку UAV-BS і NOMA з однією антеною для обслуговування великого числа наземних користувачів, де завдання оптимізації максимальної-мінімальної швидкості була сформульована шляхом спільної оптимізації декількох параметрів (наприклад, висоти польоту БПЛА, ширини променя антени передачі, потужність і пропускна здатність), і алгоритм проходження шляху був розроблений для вирішення відповідного завдання.

Як подальше просування запропоновано структуру БПЛА з підтримкою MIMO-NOMA, в якій БПЛА з безліччю антен взаємодіє з безліччю користувачів, кожен з яких обладнаний безліччю антен. Приймавши стохастичну геометрію, розташування користувачів NOMA були змодельовані як незалежні просторові випадкові процеси, і були отримані вирази в замкнутій формі для ймовірності відключення парних користувачів NOMA. При такому підході позиції БПЛА і наземних користувачів були змодельовані в мережі БПЛА з підтримкою NOMA в [11] і оцінювалася продуктивність системи. Крім того, вони застосували фреймворк машинного навчання для вирішення динамічного розміщення і переміщення БПЛА в тривимірному просторі. Зовсім недавно [12] розроблено схему спадного каналу множинного доступу з мережевим кодуванням для зв'язку БПЛА, яка була більш стійкою до постійно змінюваних умов загасаючого каналу за результатами експериментів, в той час як кооперативна схема NOMA застосовувалася в безпроводовій транспортній мережі [13], де БПЛА використовувалися в якості літаючих базових станцій з малими сотами для

максимізації сумарної швидкості всіх користувачів шляхом спільної оптимізації положень БПЛА, порядку декодування процесу NOMA і векторів формування променя передачі.

Як обговорювалося у вищезгаданій літературі, очевидно, що NOMA є гнучким і ефективним в мультиплексуванні ряду кінцевих користувачів для зв'язку БПЛА. Однак успішне використання NOMA в зв'язку з БПЛА має безліч супутніх проблем і обмежень з наступних причин:

- Відмінною особливістю NOMA з поліпшеною спектральною ефективністю є те, що на стороні приймача використовується складна технологія SIC.
- SIC покладається виключно на інформацію про стан каналу як в приймачах, так і в передавачах, щоб визначити виділену потужність для кожного приймача і порядок декодування, який необхідно точно оцінити в мережі зв'язку БПЛА.
- NOMA мультиплексує декількох користувачів в області потужності вводить міжрівневі перешкоди, необхідні додаткові зусилля для подальшого усунення виникаючих міжрівневих перешкод в зв'язку БПЛА з NOMA.
- З огляду на високу мобільність БПЛА на практиці, відстань зв'язку між БПЛА і наземними користувачами буде постійно змінюватися в залежності від вимог в реальному часі, таким чином, порядок декодування SIC, який визначається рівнями сигналу різних користувачів, змінюється в залежності від місця розташування БПЛА.

2.1.2 Когнітивні мережі БПЛА

В даний час однією із серйозних проблем, з якими стикаються безпроводові мережі з використанням БПЛА, є брак радіочастотного спектру. Багато причин, що викликають занепокоєння, перераховані нижче:

- 1) спостерігається різке зростання і використання нових портативних мобільних пристроїв на землі (таких як смартфони і планшети);

- 2) різні безпроводові мережі (Bluetooth, WiFi, LTE і стільникові мережі) співіснують в діапазонах робочого спектру БПЛА. Це веде до дуже жорсткої конкуренції за використання частотного спектру, і, таким чином, зв'язок з БПЛА зіткнеться з проблемою браку спектру [14], [15].

Отже, для зв'язку БПЛА необхідно отримати додатковий доступ до спектру за рахунок динамічного використання існуючих смуг частот.

До теперішнього часу багато дослідників і групи по стандартизації представили об'єднання систем зв'язку CR і БПЛА для збільшення можливостей спектру, що називається когнітивним зв'язком БПЛА [14], [15]. Ця концепція є багатообіцяючою архітектурою мережі, яка дозволяє співіснувати БПЛА з наземними мобільними пристроями, що працюють в одній смузі частот. У цьому випадку зв'язок БПЛА з землею може викликати серйозні перешкоди для існуючих наземних пристроїв, оскільки БПЛА зазвичай має потужні лінії прямого зв'язку з наземними користувачами.

Наприклад, [15] оптимізовано траєкторію БПЛА і розподіл потужності передачі з метою досягнення максимальної пропускної спроможності когнітивної зв'язку БПЛА, обмежуючи при цьому перешкоди, що накладаються на первинні приймачі, нижче допустимого рівня. В [16] представили базовий метод поділу спектру між мережею безпілотних чорунків і традиційної наземної мережі при різних сценаріях, тобто і спільне використання спектру мережею безпілотних чорунків і традиційної двовимірної (2D) мережі. Використовуючи теорію стохастичної геометрії, вони вивели явні вирази для ймовірності покриття чорунків дронами і досягли оптимальної щільності БПЛА-БС для максимізації пропускної здатності. Аналогічним чином Sboui et al. [17] запропонували інтегрувати нижній CR в систему БПЛА, де БПЛА в якості вторинного передавача випадково використав і спільно використовував первинний спектр для передачі БПЛА на землю. Завдання полягало в максимальному підвищенні енергоефективності БПЛА, тим самим забезпечуючи ефективну і довгострокову роботу БПЛА.

2.1.3 Енергозберігаючі мережі БПЛА

На відміну від традиційних наземних приймачів, підключених до зовнішніх джерел живлення, БПЛА заряджається від батареї з обмеженою ємністю, тому зв'язок на основі БПЛА стикається з обмеженою доступністю енергії для виконання різних операцій, таких як управління польотом, зчитування / передача даних або запуск деяких додатків. Як всім відомо, обмежений запас енергії на борту типових БПЛА (час автономної роботи зазвичай не перевищує 30 хвилин) обмежує час їх роботи (тобто час польоту або час зависання) [18], і не завжди гарантовано, що БПЛА зможе часто повертатися на склад для зарядки акумуляторів. Таким чином, це дуже важливо, але складно гарантувати стабільні і стійкі послуги зв'язку, що стане слабким місцем в продуктивності.

Енергоефективність: для багатьох додатків БПЛА економія енергії має велике значення для продовження терміну служби мережі БПЛА. В останні роки було проведено безліч досліджень механізмів розгортання та експлуатації БПЛА з урахуванням енергоспоживання. Більш конкретно, в [18] запропоновано енергоефективну схему планування передачі БПЛА в кооперативній ретрансляційній мережі таким чином, щоб забезпечити максимальне споживання енергії всіх БПЛА було зведено до мінімуму, при цьому було розроблено застосовне субоптимально рішення, і енергія могла бути зекономлена до 50% за рахунок симуляції. Використовуючи теорію оптимального перенесення, [19] досліджено енергоефективне розгортання кількох БПЛА-БС для мінімізації загальної необхідної потужності передачі БПЛА відповідно до вимог швидкості наземного зв'язку.

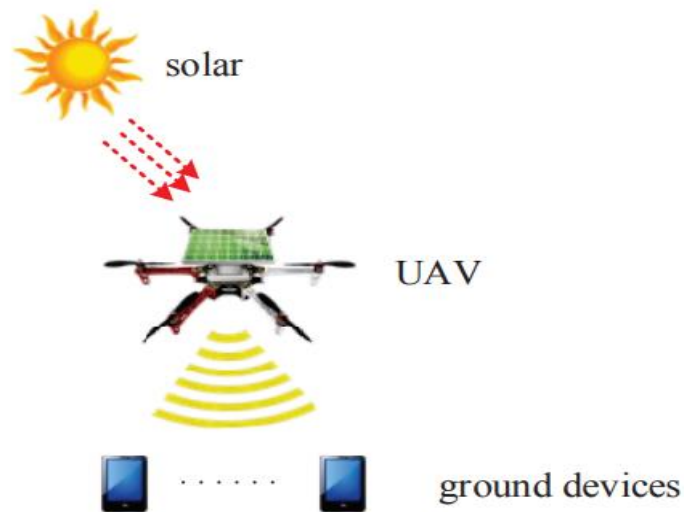


Рис. 2.4: Система зв'язку БПЛА на сонячній енергії, де БПЛА оснащений сонячними панелями, які можуть збирати енергію з сонячного джерела.

В [20] представлено енергоефективний зв'язок БПЛА шляхом оптимізації траєкторії БПЛА з фіксованою висотою, де було враховано споживання енергії рушійною силою БПЛА з нерухомим крилом і побудовано теоретичну модель. [21] розроблено енергоефективне завдання оптимізації для зв'язку БПЛА шляхом інтеграції технології CR для мінімізації загального енергоспоживання БПЛА, включаючи енергію польоту і зв'язку, де був запропонований спільний алгоритм, натхненний формулюванням Вебера, для оптимізації рівня потужності передачі і місцезнаходження когнітивного БПЛА. В [22] запропоновано структуру, яка використовувала глибоке дослідження з підкріпленням для вивчення енергоспоживання, використовуваного для пересування БПЛА, при збереженні рівнозначного покриття зв'язку та підключення до мережі. Побудували модель розгортання енергоефективного покриття для декількох БПЛА, в якій запропонована модель була розкладена на дві підзадачі, щоб спростити вибір стратегії, а саме максимізацію покриття і мінімізацію потужності.

Збір енергії: Фактично, споживання енергії БПЛА на акумуляторах зазвичай ділиться на енергію, яка споживається блоком зв'язку, і енергію, що використовується для апаратного забезпечення і мобільності БПЛА. Отже, БПЛА, що збирає енергію, має вирішальне значення для збільшення тривалості польоту

без збільшення маси або розміру паливної системи. В останніх програмах дуже вигідно збирати енергію з зовнішніх джерел для підзарядки батареї БПЛА, що називається мережами БПЛА з безпроводовим живленням. Проведено безліч пов'язаних з цим питань робіт з підвищенням довговічності БПЛА з електричним приводом. Зокрема, значна увага присвячена безпілотному літаючому апарату на сонячній енергії, яку перетворює в електричну енергію за допомогою фотоелектричного ефекту для здійснення постійного польоту, модель системи показана на рис. 2.5. Фактично, доступна сонячна енергія залежить від географічного положення, висоти, кількості світлових годин і днів на рік.

Прототипи БПЛА на сонячних батареях були розроблені інженерами [23] і [24], і вони показали можливість безперервного польоту протягом 28 годин. В [25] побудовано імітаційну модель сонячного елемента для БПЛА на сонячній енергії за допомогою програмного забезпечення MATLAB / Simulink, і вихідні характеристики сонячних панелей в трьох типах погодних умов (легкий дощ, похмурі і сонячні дні) були протестовані в Нанкіні, на випробувальному майданчику в Нанкінському університеті авіації і астронавтики. Результати експериментальних випробувань показали, що на вихідну криву сонячного елемента в основному впливають температура навколишнього середовища і інтенсивність світла. Індійський технологічний інститут Канпур [26] провів денні льотні випробування платформи сонячного БПЛА в квітні 2017 року, коли БПЛА злетів о 9:30 і успішно приземлився о 18:00. За результатами вимірювань можна було помітити, що генерована потужність стала менше, ніж потужність, необхідна для системи БПЛА, приблизно з 15:30 до 17:10. Тим часом група проектувальників літаків Кренфілдського університету в Сполученому Королівстві [27] досліджувала вплив температури і інтенсивності сонячного випромінювання на різні кути нахилу сонячних модулів, результати показали, що оптимальна робоча температура як для ламінованих, так і для ламінованих сонячних модулів становить близько 45°C . Температура і сонячна енергія збільшувалася майже лінійно по куту нахилу сонячного модуля.

З точки зору академічних досліджень залучено проект розподілу ресурсів

для системи зв'язку БПЛА з декількома несучими на сонячній енергії для максимального збільшення сумарної пропускної спроможності системи, де був запропонований нескладний спільний алгоритм розподілу тривимірного положення, потужності і піднесучих для пошуку субоптимального рішення. Оскільки аеродинамічна споживана потужність реальних систем БПЛА залежить від швидкості польоту, припущення про постійне значення споживаної аеродинамічної потужності на практиці не працює. З цієї причини [28] додатково вивчили систему зв'язку БПЛА на сонячних батареях, спільно прийнявши до уваги збір сонячної енергії, аеродинамічне споживання енергії, динаміку бортового накопичувача енергії та вимоги до якості обслуговування наземних користувачів.

Мета полягала в тому, щоб максимізувати сумарну пропускну здатність системи за період часу. Результати моделювання показали, що БПЛА може збирати більше сонячної енергії, коли летить прямо над хмарами. У [29] розглянуто сценарій ретрансляції БПЛА з обмеженнями по енергії, в якому протокол ретрансляції на основі поділу потужності був прийнятий в БПЛА для збору енергії і обробки інформації з метою максимізації пропускної здатності мережі. У міському середовищі [30] запропоновано схему планування траєкторії БПЛА на сонячних батареях, яка враховувала стан перешкод і тіньові області, викликані високими будинками. Однак збір сонячної енергії сонячними елементами часто залежить від погодних умов і є досить непередбачуваним, тому страждає від невизначеності, викликаній випадковим надходженням енергії. У більшості поточних робіт це практичне середовище не враховувалося. У цьому контексті виконана робота Sowah et al для збору навколишньої енергії для продовження часу польоту квадрокоптера в приміщенні, а також було реалізовано прототип системи збору енергії обертання. В [31] запропоновано архітектуру енергонезалежного Інтернету БПЛА, в якій станції підзарядки використовувалися для подачі енергії на БПЛА за допомогою безпроводової передачі енергії (WPT) за допомогою радіочастотних сигналів, що значно збільшувало тривалість безперервної роботи. У системах ретрансляції за допомогою БПЛА [32]

проаналізовано характеристики збоїв, коли БПЛА збирають енергію з наземної BS, де враховувалися затінені рисовські завмирання і затінені релеєвського завмирання.

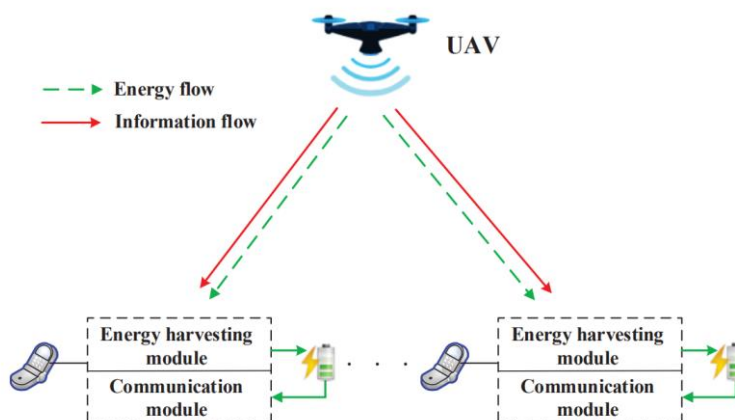


Рис. 2.5. Типовий приклад безпроводової мережі з живленням від БПЛА, де БПЛА може передавати енергію або одночасно дані і енергію на наземні пристрої користувача за допомогою радіочастотних сигналів. Частина зеленого кольору являє потік енергії, а частина червоного кольору являє потік інформації

З іншого боку, мобільні пристрої зазвичай також обмежені по енергії, а термін служби обмежений ємністю батареї. Оскільки у БПЛА більше енергії, ніж у мобільних пристроїв, і БПЛА фактично надають послуги наземним пристроїв, очікується, що БПЛА в якості повітряних передавачів енергії з додатковою гнучкістю забезпечать повсюдне безпроводове енергопостачання масивних малопотужних пристроїв. Це значно підвищує ефективність безпроводової зарядки в порівнянні зі звичайними наземними зарядними станціями в фіксованих місцях, які називаються безпроводовими мережами з живленням від БПЛА. Щоб бути конкретним, розглянуто питання поліпшення стійкої роботи датчиків на етапі зондування у вигляді датчика мережі через радіочастотний сигнал від БПЛА. Запропонували об'єднаний алгоритм оптимізації часу і потужності для максимізації середньої пропускної здатності, де БПЛА діяв як статичне джерело енергії для декількох декількох пар D2D, і був прийнятий протокол «збір-передача-збереження». Однак в цій роботі не враховувалася рухомість БПЛА.

Використовуючи конструкцію траєкторії БПЛА, представлено першу роботу по опису досяжної області енергії наземних користувачів в системі БПЕ з двома користувачами. Автори додатково розглянули багатокористувацьку систему WPT з підтримкою БПЛА, де завдання максимізації сумарної енергії і максимізації мінімальної енергії було відповідно задумано шляхом оптимізації траєкторії БПЛА з урахуванням практичних обмежень швидкості. Згодом розглянуто проблему енергоефективності в D2D-комунікаціях з БПЕ за допомогою БПЛА шляхом спільної оптимізації часу збору енергії і розподілу потужності, а потім продуктивність мережі БПЛА була оцінена за допомогою вбудованого модуля оптимізації, реалізованого на Python.

В якості подальшого розвитку [33] задіяно мережу безпроводового зв'язку з живленням від БПЛА (W-PCN) для максимізації мінімальної користувальницької пропускної здатності шляхом спільної оптимізації траєкторії БПЛА, управління потужністю висхідного каналу і розподілу часових ресурсів, де обидва сценарії - інтегрований БПЛА і окремий БПЛА. Відповідно, були прийняті до уваги WPCN. В [34] вирішено спільну задачу оптимізації траєкторії БПЛА і розподілу ресурсів для максимізації пропускної здатності висхідної лінії зв'язку в налаштуванні WPCN з підтримкою БПЛА при збереженні обмеження максимальної швидкості БПЛА і обмежень енергонезалежності користувачів.

Мережі наступного покоління повинні інтелектуально і безперешкодно об'єднувати кілька вузлів для формування багаторівневої ієрархічної архітектури, включаючи рівень дрон-стільників для великих зон радіопокриття, наземні рівні малих стільників для малих зон радіопокриття, призначений для користувацьких пристроїв рівень з комунікаціями D2D і т. д. Однак інтеграція різних рівнів призведе до появи нових проблем при дослідженні методів мережевого рівня. Отже, необхідні конкретні стратегії, координуючі QoS вузлів.

2.1.4 Застосування БПЛА в HetNets

З наближенням ери 5G, густонаселені райони користувачі жадають

широкопasmового безпроводового зв'язку, і очікується, що мережеві оператори будуть підтримувати різні послуги з високими вимогами до безпроводової передачі даних, такі як потокова передача мультимедіа та завантаження відео. Неухильне зростання обсягів мобільного трафіку лягає неприйнятним тягарем на операторів з точки зору збільшення капітальних і експлуатаційних витрат. Інтуїтивно зрозумілим варіантом розвантаження стільникового трафіку є розгортання малих чарунок (наприклад, піко- і фемтостільники). Однак в випадку несподіваних або тимчасових подій розгортання наземних інфраструктур є досить ускладненим, оскільки мобільні середовища складні, мінливі і неоднорідні. Одне з можливих рішень - використання дрона-стільника [35], що є достатньо корисним для підтримки наземних стільникових мереж в областях з мінливим попитом. Ідея полягає в тому, щоб наблизити наземних користувачів до дронів-чарунків, щоб поліпшити їх QoS за рахунок з'єднань LoS ближньої дії з неба.

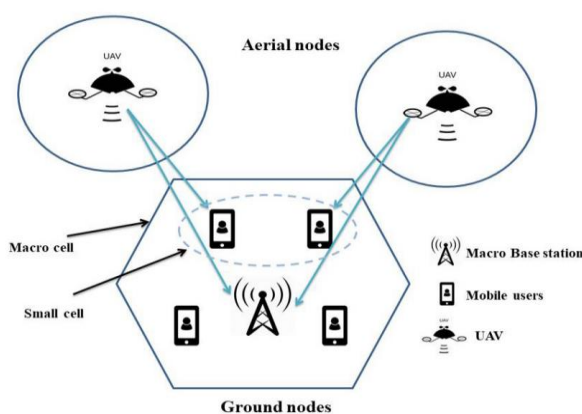


Рис. 2.6 Типова архітектура HetNet з використанням БПЛА з одного MBS і декількома дронами-стільниками.

У той же час мобільність дрон-чарунків дозволяє їм обслуговувати користувачів з високими вимогами до мобільності і швидкості передачі даних. У відкритій літературі можна виділити два канонічних напрямки досліджень: наземні HetNets і повітряні HetNets. У першому випадку, зосередивши увагу на характеристиці наземних мереж HetNets, [36] представили плаваючі реле на базі БПЛА для обробки зростаючого обсягу трафіку через швидкий розвиток мобільного Інтернету, коли БПЛА були розміщені всередині невеликого

приміщення.

Рішення з оптимізованої смугою пропускання було запропоновано для забезпечення гетерогенного розгортання плаваючих ретрансляційних чарунків на базі БПЛА всередині макростільника і досягнення динамічного і адаптивного покриття. У дворівневій мережі HetNet з БПЛА [37] розробили оптимальне розгортання БПЛА, і метод координації перешкод, певний в LTE-Advanced, був використаний для зменшення міжстільникових перешкод, що виникають через HetNet. В [38] була спрямована на вивчення великомасштабного постраждалого від стихійного лиха середовища, що складається з MBS і малих базових станцій (SBS), в яких БПЛА були призначені для забезпечення покриття і безперебійного широкосмугового зв'язку в конкретних регіонах. Було запропоновано алгоритм для оптимізації положення БПЛА-БП з метою максимізації пропускної здатності мережі.

В якості подальшого просування проблеми призначення БПЛА на основі запитів користувачів в HetNets була досліджена в [39], була сформульована заснована на нейронах структура функції витрат, щоб охопити відповідні області попиту користувачів і БПЛА для збільшення пропускної здатності мережі. В [40] розглядається гетерогенна мережа, яка містить набір БПЛА в якості літаючих базових станцій і набір наземних базових станцій, які надають безпроводову послугу за запитом групи користувачів стільникового зв'язку. Вони розробили нову структуру машинного навчання для прогнозування трафіку стільникових даних і сформулювали завдання мінімізації потужності для вхідного потоку і мобільності, щоб оптимізувати розгортання БПЛА. Крім того, схема мінімальної затримки широко вивчалася в HetNets з використанням БПЛА для поліпшення QoS мобільних користувачів. Наприклад, в [41] концепція ентропійних мереж з нейронної мережі була застосована для мінімізації загальної мережевої затримки за рахунок оптимізації розміщення і розподілу взаємодіючих БПЛА в областях попиту. В [42] намагалися збалансувати навантаження трафіку між UAV-BS і MBS для досягнення мінімального загального середнього коефіцієнта затримки між MU при обмеженнях енергії UAV-BS.

Сформульована задача оптимізації складалася з двох етапів, а саме: спочатку визначення місця розташування БПЛА-БП, а потім оптимізація зони покриття зв'язку БПЛА-БП.

Інший напрямок досліджень встановив, що майбутні повітряні мережі будуть неоднорідними і поєднуюватимуть в собі різні типи БПЛА, а саме висотні БПЛА дальньої дії (менше 5 км), середньовисотні БПЛА (від 5 до 10 км), маловисотні БЛА малої дальності, дальність польоту БПЛА (більше 10 км) [43]. Багаторівневі повітряні мережі в значній мірі залежать від щільності користувачів і послуг і можуть бути побудовані з використанням декількох типів БПЛА, що аналогічно наземним HetNets з макро-, малими-, пікостільниками і ретрансляторами. В якості початкового дослідження [44] представлено концепцію повітряної мережі HetNet для розвантаження трафіку даних з перевантажених наземних базових станцій в гарячих точках, де рій невеликих БПЛА було розгорнуто як спеціалізовану мережу зі змінними робочими висотами в повітрі. Також було показано поліпшення продуктивності мережі. Щоб забезпечити збільшення пропускної спроможності і покриття HetNets, в [45] була представлена вирішальна і спільна проблема на основі MBS для точного відображення БПЛА в області попиту, де як однорівнева модель з декількома БПЛА, так і відповідно розглядалася багаторівнева модель з декількома БПЛА в кожному рівні.

Для точного і ефективного розміщення БПЛА було запропоновано інтелектуальне рішення, яке використовує підходи пріоритетного домінування і ентропії. Дослідження багаторівневої мережевої архітектури БПЛА в порівнянні з традиційною однорівневою мережею БПЛА з точки зору спектральної ефективності передачі по низхідній лінії зв'язку визначили відповідні проблеми, такі як енергоспоживання дронів, управління перешкодами і т.д. Вплив різних міських середовищ (включаючи багатопверхові міські, приміські та густонаселені райони) на архітектуру цієї багаторівневої мережі БПЛА, нарешті, було продемонстровано чисельними результатами.

2.1.5 Комбіновані БПЛА і засоби зв'язку D2D

Зв'язок D2D як нова мережева архітектура стає все більш популярною, що різко збільшує пропускну здатність мережі за рахунок розвантаження мобільного трафіку з базових станцій, коли два сусідніх вузла зв'язуються один з одним в режимі D2D. Як правило, зв'язок D2D зазвичай розгортається з використанням ліній передачі, які повторно використовують існуючі ресурси з ліцензованим спектром, в той час як БПЛА може бути хорошим кандидатом для швидкого створення безпроводової мережі з підтримкою D2D, вводячи новий вимір, як показано на Рис. 2.6. Паралельно робота БПЛА разом з D2D-зв'язком в спільно використовуваній смужці спектру також викличе серйозні проблеми управління перешкодами, тому слід проаналізувати вплив мобільності БПЛА на D2D і продуктивність мережі. Щоб отримати всебічний аналіз характеристик для оцінки співіснування БПЛА і D2D з точки зору різних показників продуктивності, в яких були розглянуті обидва ключових сценаріїв, а саме статичний БПЛА і мобільний БПЛА, відповідно.

Також розглядалась схема призначення радіоканалів в об'єднаній мережі на основі БПЛА і D2D з урахуванням високої мобільності БПЛА і вузлів D2D, в яких БПЛА можна було використовувати як в якості локальних серверів контенту, так і в якості повітряних вузлів D2D. Більш того, алгоритм розподіленої антикоординованої гри був розроблений для вирішення проблеми призначення каналів. У безпроводової мережі з декількома БПЛА і зв'язком D2D проаодили аналіз ймовірності охоплення користувачів низхідної лінії зв'язку і користувачів D2D для оптимізації висоти польоту БПЛА, щоб максимізувати пропускну здатність наземної мережі. Використання БПЛА для виявлення потенційних пристроїв D2D для організації передачі D2D в якості мережі екстреного зв'язку. За допомогою результатів моделювання стало розуміло, що це може знизити споживання енергії пристроєм і збільшити пропускну здатність мережі.

Концепція повного дуплексу була введена до систем ретрансляції за допомогою БПЛА з базовим зв'язком D2D, в яких потужність передачі і траєкторія БПЛА були спільно розроблені для того, щоб домогтися ефективного

розподілу спектра між повітряними БПЛА і наземним зв'язком D2D. Крім цього, пропонувалося застосувати кілька вузлів D2D до підтримуваних БПЛА соціальних мереж для максимізації загальної корисності соціальної групи, де враховувалися як фізичне втручання, так і соціальні зв'язки між користувачами в фізичній та соціальній сфері.

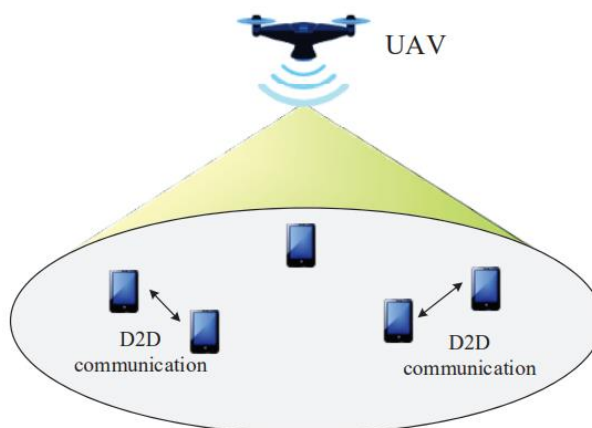


Рис. 2.6. Зв'язок D2D, що лежить в основі мережі, підтримуваної БПЛА.

2.1.6 Програмно-визначні мережі БПЛА

Недавні пропозиції по майбутнім архітектурам безпроводових мереж спрямовані на створення гнучкої мережі з підвищеною маневреністю і стійкістю до відмов. SDN була введена в 2008 році для програмування мережі за допомогою логічно визначеним програмним забезпеченням контролера, який може розділяти площину управління і площину даних для полегшення реконфігурації мережі. Це полегшує управління інфраструктурою і ресурсами безпроводових мереж. У порівнянні з традиційними мережами SDN має кращу керованість і прозорість для мережевих компонентів, що дозволяє керувати мережею за допомогою загального контролера.

У реальних додатках безпілотні чарунки безпроводові мережі повинні бути ефективно налаштовані для безперешкодного залучення та вилучення БПЛА, наприклад, для зміни протоколів і створення нових шляхів. На основі архітектури SDN безпілотні літаючі апарати можуть виконувати функції комутаторів SDN на площині даних для збору контекстної інформації розподіленим чином, в той час

як наземні BS є контролерами, які збирають дані і приймають рішення в управлінні мережевими функціями і розподілом ресурсів. За допомогою SDN реконфігурація мережі та розподіл ресурсів між безліччю БПЛА можуть виконуватися більш гнучко. [45]

Була спроба використати структуру управління безпілотними апаратами на основі SDN і технологій віртуалізації зв'язку із мережею для підтримки наземної мережі HetNet. Для архітектури БПЛА на основі SDN запропонований варіант SDN надавав можливість передачі обслуговування в БПЛА (як перемикачі пересилання на вимогу), які підтримували безпроводові мережі з більш низькою затримкою передачі обслуговування. Оскільки SDN може забезпечити глобальний огляд мережі, розглянуто розміщення контролера SDN в мережі БПЛА на основі SDN для забезпечення кращого обслуговування, де компроміс був досягнутий між накладними витратами зв'язку і наскрізною затримкою для обміну службовою інформацією між БПЛА і SDN-контролером. Вивчали розподіл ресурсів в мережі з декількома БПЛА для мінімізації робочих затримок і енергоспоживання з урахуванням граничних серверів і хмарних серверів. Управління мережею між цими пристроями було включено контролером SDN ефективним чином, так що вимоги QoS додатків були забезпечені. Розроблено структуру попереджувального розгортання осередків БПЛА, щоб зменшити умови перевантаження, викликані раптовим масовим трафіком. У цьому контексті технологія SDN використовувалася для безперешкодної інтеграції та дезінтеграції групи дронів шляхом переналаштування мережі. Аналогічним чином проведено дослідження стійкої структури багатоколіїної маршрутизації для мережі БПЛА, в якій контролер SDN використовувався для визначення кращих маршрутів, схильних до заклинювання. Також було запропоновано протокол управління повітряною мережею, побудованої на основі архітектури SDN, де кожен БПЛА став програмним комутатором, який виконує керуючі директиви, відправлені централізованим контролером. Нарешті, був запропонований алгоритм багатоколіїної маршрутизації для зниження середньої швидкості наскрізних відключень. [46]

Передбачається, що в безпроводову мережу 5G будуть вбудовані різні ресурси для підтримки масового трафіку і різних послуг. Це буде характеризуватися конвергенцією можливостей зв'язку, обчислень і кешування. Як важливий компонент IoT і майбутніх мереж 5G, БПЛА може не тільки виступати в якості платформи прикордонних обчислень для надання гнучких і відмовостійких послуг для пристроїв IoT з обмеженими можливостями обробки, але також виступати в якості додаткового методу кешування деякого популярного контенту для зменшення робочого навантаження і затримки передачі в піковий час. Архітектура БПЛА-орієнтованого зв'язку, обчислень і кешування показана на рис. 2.7.

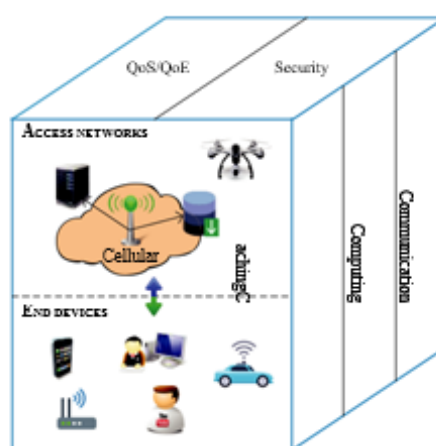


Рис. 2.7: Архітектура БПЛА-орієнтованого зв'язку, обчислень і кешування

2.1.7 Застосування БПЛА на базі МЕС

Через обмежену ємність батареї і низьку обчислювальну потужність пристроїв Інтернету речей складно виконувати додатки в реальному часі. Нещодавно МЕС перетворилася в парадигму для вирішення цієї проблеми. З розгортанням серверу МЕС мобільні користувачі можуть перекласти свої обчислювальні завдання на сервера оператора, розширивши можливості хмарних обчислень. Він служить двом важливим цілям:

1. Зменшення затримки додатків (тобто часу виконання), якщо віддалений пристрій має величезні обчислювальні ресурси.

2. Підвищення продуктивності батареї, оскільки додаток виконується на віддаленому пристрої.

У мережах з підтримкою БПЛА мобільні пристрої з обмеженими ресурсами можуть перекласти свої ресурсомісткі завдання на літаючий БПЛА з високими обчислювальними можливостями, тим самим заощаджуючи енергію і знижуючи навантаження трафіку на фіксованих хмарних серверах. Таким чином, БПЛА, оснащений сервером МЕС, пропонує багатообіцяючі переваги в порівнянні зі звичайною наземною мережею з фіксованими BS. Системна модель МЕС, встановленого на БПЛА, показана на рис. 2.8.

В такому випадку всі мобільні пристрої має вибрати або локальні обчислення, або граничні обчислення. У першому випадку мобільні пристрої можуть локально виконувати свої власні завдання за допомогою вбудованого мікропроцесора, це буде займати їх локальні обчислювальні ресурси і споживати велику кількість енергії. В останньому випадку мобільним пристроям дозволено передавати свої інтенсивні обчислювальні завдання безпосередньо на сервер МЕС, розташований в БПЛА, а потім сервер МЕС буде виконувати обчислювальні завдання від імені мобільних пристроїв. Фактично, всі мобільні пристрої пов'язані з найближчим вузлом БПЛА, у якого в даний час достатньо енергії батареї і обчислювальних ресурсів. У таблиці IX показаний значний обсяг робіт по МЕС на базі БПЛА. [46]

Ідея установки процесора МЕС на БПЛА була спочатку висунута Jeong. це дало мобільним пристроям можливість розвантаження обчислень. У цій роботі автори розглянули мобільний пристрій і БПЛА з метою мінімізації енергоспоживання мобільного пристрою за рахунок оптимізації розподілу бітів для зв'язку по висхідній / низхідній лінії зв'язку в умовах заздалегідь визначеної траєкторії БПЛА. Після цього представили розширення для налаштування декількох мобільних пристроїв, проблема оптимізації розподілу бітів і траєкторії БПЛА була вирішена для мінімізації споживання енергії мобільними пристроями з урахуванням затримки і обмежень енергетичного бюджету БПЛА, де розглядалися схеми ОМА і NОМА відповідно. Обговорювали високо-динамічно

соціальну мережу, підтримувану хмарами, встановленими на БПЛА, де БПЛА використовувалися для швидкої побудови стільникової мережі розвантаження. З розгорнутими БПЛА з високопродуктивними обчислювальними хмарками, як обчислювальне навантаження, так і навантаження трафіку можуть розподілятися від центральної хмари до краю мережі, так що обчислювальне навантаження на хмарні сервери і навантаження трафіку зменшуються. Зосередили свою увагу на проблемі мінімізації потужності в системі МЕС з підтримкою БПЛА шляхом спільної оптимізації розрахункового розвантаження і проектування траєкторії. У цій ситуації, що розглядається БПЛА грав подвійну роль, а саме, він не тільки виконував обчислювальні завдання, вивантаження з мобільних пристроїв, але також діяв як передавач джерела для підзарядки пристроїв на батарейках. [47]

З іншого боку, бортовому процесору в БПЛА може не вистачити обчислювальних ресурсів через те, що сам БПЛА невеликого розміру. Це обмежує ефективне виконання складних додатків. Батарея і продуктивність обчислень безпілотного літаючого апарату можуть бути практично поліпшені за рахунок розвантаження обчислень на віддалений хмарний сервер або сусідні прикордонні сервери через MBS або SBS. Таким чином, вузол БПЛА може або обробляти додаток, використовуючи свої власні ресурси, або відправляти свої обчислювальні завдання на прикордонний сервер або віддалена хмара для обробки відповідно до вимог QoS додатків. Коли БПЛА швидко обробляють зображення з високою роздільною здатністю, розглянуто проблему браку енергії і обчислювальних ресурсів, перенісши обробку даних на GCS, щоб продовжити час польоту БПЛА. Після того, як GCS завершив обробку зображення, GCS повернув оброблені зображення БПЛА для поточної оперативної місії. Згідно варіанту використання розпізнавання осіб розглянув перенесення їх обробки з БПЛА на вузол МЕС. Також був розроблений стенд з точки зору практичної реалізації, щоб показати вигреш в продуктивності підходу розвантаження на основі МЕС в порівнянні з локальною обробкою відеоданих на борту БПЛА з точки зору енергоспоживання і часу обробки. Крім того, проблема енерговитрат на розвантаження обчислювальних задач з багатоцільових БПЛА на наземні БС була

розглянута в, де були запропоновані і зіставлені чотири типи схем доступу при передачі по висхідній лінії зв'язку.

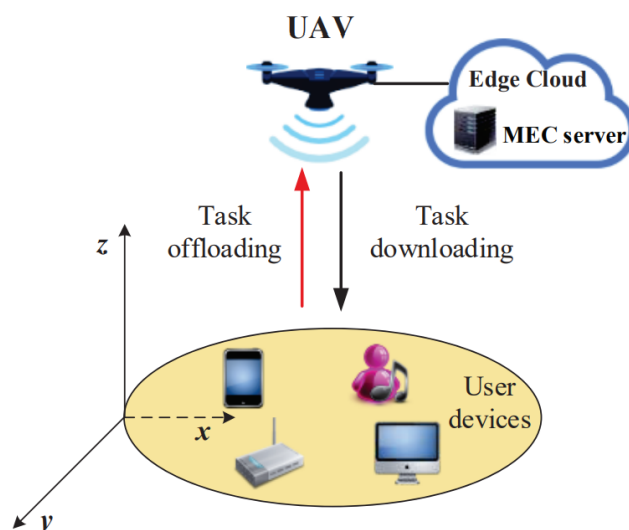


Рис. 2.8: Ілюстрація встановленої на БПЛА системи МЕС, яка забезпечує можливість розвантаження додатків на наземних призначених для користувача пристроях.

2.1.8 Застосування БПЛА для кешування

Трафік безпроводової передачі даних різко виріс в останні роки через поширення нових мобільних пристроїв і різних мобільних додатків. Рушійні сили цього зростання трафіку в корені змістилися з неухильно зростаючого попиту на зв'язок, орієнтовану на з'єднання (наприклад, смартфони і текстові повідомлення), на вибухове зростання комунікацій, орієнтованих на контент (таких як потокове відео і популярна музика). Незважаючи на те, що SBS щільно розгорнуті для обслуговування величезного обсягу трафіку, на транзитні канали буде покладено важке навантаження. Фактично, транспортна мережа не може впоратися з вибуховим зростанням мобільного трафіку. Одним з перспективних методів є інтелектуальне кешування деякого популярного контенту на кордоні мережі (наприклад, безпілотних літаючих апаратів, реле або пристроїв D2D), таким чином, потреби користувачів в однаковому популярному контенті можуть бути

легко задоволені без дублюючих передач через зворотні канали.

Загалом, мобільні користувачі постійно переміщуються, тому бажана більш гнучка стратегія кешування. БПЛА в якості літаючої БС може динамічно кешувати популярний контент, відстежувати моделі мобільності безпроводових пристроїв і потім ефективно їх обслуговувати. Це не тільки значно знижує затримку передачі, але також знижує навантаження на трафік при зворотному шляху, особливо під час пікового навантаження. При прикордонному кешуванні за допомогою UAV, вміст може безпосередньо кешуватися в UAV-BS, а потім поширюватись серед користувачів або кешуватися в пристроях D2D і заплановано UAV-BS . У першому випадку вміст може кешуватися на БПЛА-БП під час непікових навантажень. Що стосується останнього, мобільні користувачі можуть кешувати запитаний вміст і поширювати його серед найближчих користувачів після планування наземних BS або UAV-BS. Такі стратегії прикордонного кешування можуть підвищити якість обслуговування (QoE) користувачів при одночасному зменшенні необхідної пропускну здатності каналу зворотної передачі. [48]

Більш конкретно, представили ідею локального кешування популярного контенту на літаючих БПЛА в системі неліцензійного діапазону LTE, яка дозволяла їм безпосередньо передавати дані, що надають послуги наземним користувачам, де був запропонований алгоритм динамічного розподілу ресурсів на основі машинного навчання для автономного навчання і визначити, який контент кешувати і як виділити ліцензовані і не ліцензовані діапазони. Була досліджена проблема попереджувального розгортання БПЛА з кеш-пам'яттю в хмарній мережі радіодоступу для мінімізації потужності передачі БПЛА. Зокрема, було запропоновано нову структуру машинного навчання мереж ехо-станів, засновану на концепції, для ефективного прогнозування розподілу запитів контенту і шаблону мобільності кожного з користувачів. Крім того, були визначені оптимальні місця розташування БПЛА і вміст для кешування на БПЛА.

Обговорено схему попереджувального кешування для продовження терміну служби БПЛА, при якій БПЛА активно доставляв файли на підмножину вибраних

наземних вузлів, які спільно кешуватимуть всі файли. І потім файли можуть бути вилучені кожним наземним вузлом або безпосередньо з його локального кеша, або з його найближчого сусіда через зв'язок D2D. Результати моделювання показали великий потенціал попереджувального кешування в рішенні проблеми обмеженою витривалості. Тим часом досліджували кешування безпечну передачу за допомогою БПЛА в надщільній мережі, де потокове відео кешуватиметься як на БПЛА, так і на SBS одночасно. Вирівнювання перешкод було використано для усунення перешкод між наземними користувачами, і SBS додатково використовувалися для переривання потенційного підслуховування шляхом генерації сигналів перешкод. З огляду на практичний вплив груп поширення розроблено спільну схему кешування вмісту та місця розташування послуг БПЛА в мережі з декількома БПЛА з метою досягнення компромісу між ймовірністю обслуговування користувача і накладними витратами на передачу, де сформульоване завдання оптимізації була змодельована як гра кешування БПЛА і можна було отримати оптимальне рішення. [48]

2.2 Майбутні напрямки досліджень

Незважаючи на потенціал поєднання БПЛА з технологіями 5G, дослідження безпроводових мереж на базі БПЛА все ще знаходяться на початковій стадії, і багато відкритих питань вимагають подальшого вивчення. У цьому розділі ми проливаємо світло на нові можливості в розвитку мережевої архітектури і виділяємо цікаві теми досліджень для майбутніх напрямків.

1) Ефективність зарядки енергії

Обмеження енергії - це вузьке місце в будь-якому сценарії зв'язку з БПЛА. Як недавніх розробок в акумуляторних технологіях, таких як поліпшені літій-іонні батареї і водневі паливні елементи, збір енергії використовується для збільшення часу польоту за рахунок використання екологічно чистих джерел енергії (таких як сонячна енергія). Однак ефективність збору енергії щодо нижче через більшої відстані і випадкового надходження енергії. Для підвищення ефективності

зарядки великий інтерес представляють нові технології доставки енергії, такі як формування діаграми спрямованості енергії за допомогою методів з безліччю антен і розподіленого багатоточкового БПЕ

2) Зв'язок між БПЛА і БПЛА і супутник з БПЛА

Щоб надати послуги зв'язку наземним безпроводових пристроїв на значно великій території, група безпілотних літальних апаратів створює мережу з декількома перемикачами, щоб допомогти пристроїв відправляти і приймати пакети, кожен з яких має свою траєкторію. Однак через високошвидкісний мобільності і необхідності підтримувати тісні канали зв'язку з наземними користувачами, з'єднання каналу зв'язку з сусідніми БПЛА часто відключається. В цьому випадку всі традиційні протоколи маршрутизації не можуть добре працювати в FANET. Таким чином, як управляти польотом безпілотних літальних апаратів, щоб забезпечити гарне обслуговування, є складним завданням. Крім того, при взаємодії декількох БПЛА запобігання зіткнень також стали значним досягненням для безпечної експлуатації БПЛА. З іншого боку, в сучасних моделях каналу зв'язку супутник-БПЛА відсутні докладні ефекти поширення. Використання моделей поширення каналів для зв'язку супутник-БПЛА все ще перебуває в зародковому стані і залишається темою для майбутніх досліджень.

3) Взаємодія різних сегментів

Для інтегрованої мережі космос-повітря-земля головна проблема полягає в тому, як використовувати переваги інноваційних методів для забезпечення безшовної інтеграції між космічної мережею, повітряної мережею і наземної мережею. Таким чином, бажано розробити деякі спільні стимули між різними сегментами, і для забезпечення надійності зв'язку необхідні спеціалізовані міжрівневого протоколи. У такій складній мережевому середовищі також важливо надати масштабовані і гнучкі інтерфейси для цих сегментів, щоб вони могли взаємодіяти і співпрацювати для досягнення привабливих переваг, тобто того, як реалізувати безперешкодний обмін інформацією і передачу даних між гетерогенними мережами. Наприклад, зростаюче розмаїття послуг може вимагати, щоб БПЛА

були шлюзами між різними мережами.

4) Безпека і конфіденційність

Інтегрована мережа може зіткнутися з зловмисними атаками через відкритих каналів і динамічних топологій, які закривають критично важливу область навмисними перешкодами / переривань. У мережах з БПЛА безпека важлива, оскільки БПЛА завжди залишаються без нагляду, що дозволяє легко захопити їх або атакувати. Щоб уникнути зловмисної модифікації, необхідний безпечний і легкий механізм запобігання таких атак, як підслуховування, атака типу «зловмисник в середині» і т. Д. Рішення на основі штучного інтелекту були запропоновані для вирішення проблем безпеки у випадках використання БПЛА, підключених до стільникового зв'язку, в той час як гра з мережевим заборону з нульовою сумою була рекомендована для виявлення загроз кіберфізической безпеки в системах доставки БПЛА. У великій зоні покриття інтегрованих мереж космос-повітря-земля, Контролери SDN відповідають за управління ресурсами і контроль роботи мережі, тому необхідно терміново захистити контролери SDN від різних кібератак, коли зловмисники можуть прослуховувати дані і керуючі сигнали, що передаються по радіоканалах систем БПЛА. Про кібератаки на системи БПЛА залишається серйозною проблемою, яку необхідно подолати при істинному використанні БПЛА. Отже, для протидії зловмисним кібератак потрібна розробка своєчасних стратегій і контр-механізмів.

5) Об'єднані автомобільні мережі "космос-повітря-земля"

Інтеграція зв'язку космос-повітря-земля в автомобільні мережі може забезпечити високу швидкість передачі даних для користувачів транспортних засобів в міських / приміських районах по наземної мережі, повсюдне з'єднання між транспортними засобами в сільських і віддалених районах за допомогою супутникової мережі, а також розширення покриття інфраструктури та збір мережевої інформації в бідних або перевантажених районах за допомогою БПЛА. З цієї причини в роботі запропонована структура з використанням БПЛА для інтеграції БПЛА з наземними транспортними мережами для ефективного

збільшення продуктивності системи.

В екосистемі зв'язку космос-повітря-земля висока мобільність супутників і БПЛА буде постійно змінювати стан каналу поширення з точки зору втрат на трасі в вільному просторі та ефекту Доплера. Щоб впоратися з проблемами взаємодії між мережами космос-повітря-земля і автомобільними мережами, потрібно ефективно спроектована мережева архітектура. Далі, для підтримки доставки даних з малою затримкою та високою надійністю необхідно додатково розглянути всеосяжний механізм управління, що координує розподіл спектра, планування ліній і розробку протоколу для каналу поширення космос-повітря-земля. [49]

б) Інтеграція мереж, обчислень і кешування

Незважаючи на те, що існуючі дослідження проводилися окремо по мережах, обчисленням і кешуванню в безпроводових мережах, спільне розгляд трьох передових методів має бути ретельно продумано і систематизовано для задоволення внутрішніх вимог інтелектуального Інтернету речей наступного покоління і навіть для здійснення угоди. -викл між експлуатаційними витратами (наприклад, споживання енергії) і перевагами продуктивності (наприклад, зменшенням затримки). В літературі розроблена архітектура для інтеграції програмно-визначених мереж, кешування і обчислень, а також детально описані ключові компоненти площин даних, контролю та управління. Пізніше в літературі був запропонований підхід до навчання з глибоким підкріпленням великих даних, щоб забезпечити динамічну оркестровку мережевих, кешуючих і обчислювальних ресурсів для підвищення продуктивності додатків в розумних містах.

Повне використання мережевих, обчислювальних і кешуючих технологій може істотно доповнити поточний розвиток Інтернету речей, однак нові функції також створюють несподівані проблеми, які не можна вирішити безпосередньо за допомогою традиційних підходів, розроблених для низькошвидкісних систем Інтернету речей. Таким чином, питання про те, як ефективно інтегрувати існуючі можливості для вирішення фундаментальних проблем інтелектуального Інтернету

речей, залишається темою для майбутніх досліджень. проте нові функції також створюють несподівані проблеми, які не можна вирішити безпосередньо за допомогою традиційних підходів, розроблених для низькошвидкісних систем Інтернету речей. Таким чином, питання про те, як ефективно інтегрувати існуючі можливості для вирішення фундаментальних проблем інтелектуального Інтернету речей, залишається темою для майбутніх досліджень. проте нові функції також створюють несподівані проблеми, які не можна вирішити безпосередньо за допомогою традиційних підходів, розроблених для низькошвидкісних систем Інтернету речей. Таким чином, питання про те, як ефективно інтегрувати існуючі можливості для вирішення фундаментальних проблем інтелектуального Інтернету речей, залишається темою для майбутніх досліджень. [49]

7) Мінливись навколишнього середовища

Оскільки майбутні безпроводові мережі можуть забезпечувати гетерогенні ресурси зв'язку, обчислень і кешування, дуже важливо ефективно використовувати ці різноманітні ресурси для підтримки різних додатків великих даних. Зосередили свою увагу на синергетичних і додаткові функції великих даних і екосистеми 5G, які дозволили постачальникам послуг, контенту і функцій розгорнути свої послуги / контент / функції на кордонах мережі, а мережа передачі даних сприяла отриманню даних і великим даними. було надано допоміжний кешування прикордонного контенту. Оскільки масивні мережеві дані можуть використовуватися для навчання моделей прогнозування для прогнозування майбутніх мережевих подій, попереджувальні дії можуть виконуватися заздалегідь, щоб уникнути збоїв в мережі або збоїв в обслуговуванні.

8) Інші цікаві теми

Крім розглянутих вище перспектив, залишається ще багато відкритих питань, пов'язаних з практичністю виконання.

Зв'язок БПЛА. Наприклад, в певних сценаріях застосування (наприклад, в лісах) можуть існувати перешкоди і численні розсіювачі між БПЛА і наземними користувачами, що дозволяє отримати більш реалістичну модель каналу повітря-

земля, яка включає температуру, вітер, листя і міське середовище. це цікава проблема, яка заслуговує майбутніх досліджень. Крім того, в багатокористувацьких системах NOMA, що підтримують БПЛА, було показано, що оптимальні алгоритми кластеризації користувачів і об'єднання користувачів в пари - це маловивчені області. Крім того, нові безпілотні системи управління повітряним рухом можуть бути необхідні для безпечного управління високою щільністю руху БПЛА на малій висоті, який відповідає за спільне планування шляху і запобігання зіткнень декількох БПЛА. Система антенних решіток на основі БПЛА - ще один фактор, що забезпечує високу швидкість передачі даних і малий час обслуговування, оскільки кількість антенних елементів (тобто кількість БПЛА) не обмежена просторовими обмеженнями. Очікується, що для запобігання витоку конфіденційності при спілкуванні з БПЛА та забезпечення цілісності даних, зібраних з БПЛА, технологія блокчейна (наприклад, повітряний блокчейн) стане новою парадигмою для безпечного і адаптивного підтримки налаштувань конфіденційності під час процесу зв'язку БПЛА і GCS. [49]

3 ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА.

3.1 Опис системи MMWAVE, що моделюється

Сучасні системи зв'язку можуть бути керованими повітряними вузлами, наприклад коптерами або літаючими апаратами. Досліджувалась можливість обслуговування БПЛА з використанням розгортання мереж LTE з антенами BS, націленими на наземне покриття.

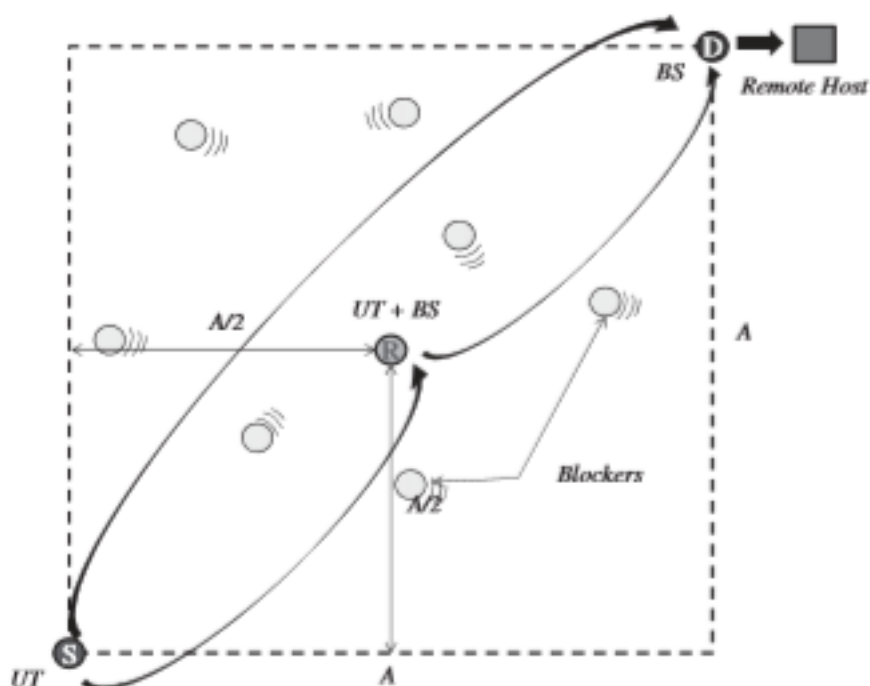


Рис. 3.1. Вид зверху модельованої системи mmWave з використанням безпілотного літаючого апарату (БПЛА).

Чорні стрілки на рис 3.1 показують потоки UDP від призначеного для користувача терміналу (UT) до віддаленого хосту. Блокатори розміром з людину переміщуються випадковим чином в квадраті зі стороною A. [50]

Мобільна ретрансляція була запропонована в системах LTE. Очевидно, що ця технологія виникла з технологій попереднього покоління і стала життєво важливою частиною систем зв'язку 5G. З точки зору продуктивності система mmWave, більш вразлива для блокування, повинна забезпечувати більшу

пропускну здатність, ніж система LTE. Крім того, він буде містити більше даних і його можна буде легше розширити за допомогою БПЛА.

Сценарій, в якому БС безпілотною літаючого апарату (БПЛА-БС) розгортається для забезпечення покриття великого стадіону / концерту з тисячами мобільних користувачів, розподілених на землі.

Нова структура, яка використовує орієнтовану на користувача інформацію, таку як розподіл запитів контенту і шаблони мобільності, для ефективного розгортання БПЛА з підтримкою кешування при максимальному підвищенні якості взаємодії (QoE) користувачів з використанням мінімальної загальної потужності передачі БПЛА. [50]

Проаналізовано систему mmWave, яка складається з UT, BS і UAV-BS (Рис.3.1 і Рис 3.2). БПЛА з підтримкою MmWave - це об'єднаний об'єкт UT + BS. У роботі розглянуто діапазон 28 ГГц, який забезпечує безліч переваг, таких як розгортання антенних решіток і висока пропускну здатність. Умови прямої видимості (LOS) і відсутності прямої видимості (NLOS) не підходять, за винятком дуже коротких ділянок. Розглядаємо можливість використання БПЛА для поліпшення показників QoS при передачі в місцях з скупченням людей, де шлях прямої видимості заблокований перешкодами розміром з людину. Розглянемо БПЛА-БС як стаціонарну БС.

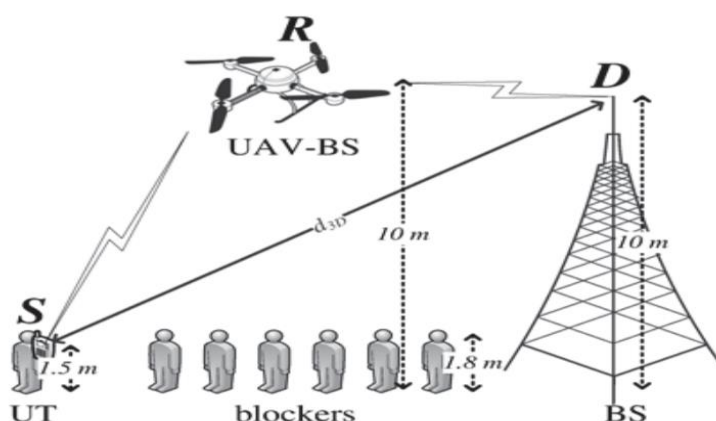


Рис. 3.2. Призначений для користувача термінал (UT), базова станція (BS) і безпілотний літаючий апарат.

Система, яка застосовує дрони для зв'язку за допомогою mmWave, дає безліч можливостей і проблем для протоколів низького і високого рівня і грає важливу роль в розвитку ефективних комунікацій mmWave. [50]

Промені на частотах КВЧ працюватимуть між UT та UAV-BS, UAV-BS і BS (Рис 3.2). Очікується, що в кінцевому підсумку промінь міліметрового діапазону буде доставлятися з більшою ефективністю за допомогою БПЛА-БП.

Досягнутий прогрес в аналітичному моделюванні технології mmWave був життєво важливий для великого поштовху в області моделювання системного рівня. Однією з декількох розробок, доведених до успішного завершення дослідниками, була LTE-подібна мережа 5G, реалізована в інструменті моделювання NS-3. У цьому середовищі моделювання використовуються існуючі аналітичні моделі втрат на трасі, просторової узгодженості (Процедура А) і дрібномасштабних завмирань.

Змодельовано сценарій представлений на рисунках 3.1 і 3.2. Ми розглядаємо систему, яка складається з БС, УТ і БПЛА-БС. Під час моделювання БПЛА-БП підключається як до ПТ, так і до БС за допомогою каналів зв'язку mmWave. BS розглядає UAV-BS як звичайний УТ. З іншого боку, УТ розглядає BS і UAV-BS як дві різні базові станції.

Використано `mmwave-simple-eps.cc` сценарій із прикладів на github.com/nyuwireless-unipd/mmwave для моделювання передачі пакетів від УТ до віддаленого хосту в Інтернеті через BS і Evolved Packet Core (EPC). І BS, і UAV-BS підключені до PGW / SGW і далі до Інтернету. Канал MmWave між БПЛА-БС і БС реалізований як канал між літаючим ПТ і БС (рисунок 3.2). Цей літаючий УТ з'єднаний з літаючою BS через внутрішній релейний інтерфейс. Цей інтерфейс робить UAV-BS прозорим для пакетів від УТ до BS і навпаки. У пристроях MmWave використовується дуплексний схема з тимчасовим поділом каналів (TDD). [50]

Моделювання забезпечує практичну користь мережі mmWave на базі LTE з використанням БПЛА. Параметри моделювання представлені в таблиці I (рис. 3.1 і рис. 3.2). Змодельовано ці вузли в сценарії Rural Macrocell (RMa) моделі

поширення 3GPP з модулем будівель NS - 3. Модель каналу 3GPP рекомендується для оцінки QoS в системах mmWave. В даний час сценарій RMa підтверджений тільки для частот до 7 ГГц але це реалістичний сценарій для системи міліметрових хвиль з використанням БПЛА. Під час моделювання ми розглядаємо дві загальні причини низького наскрізного QoS в системах mmWave: втрати на тракті та завади

A. Втрати на шляху

Втрати на трасі можуть бути описані за допомогою аналітичної моделі розповсюдження сигналу 3GPP. Розглядаємо сценарій сільського макростільника (RMa), який має безліч обмежень на мінімальну і максимальну висоту BS і UT. Який можна застосовувати частотний діапазон формули втрат на трасі (PL) становить $0,8 < f_c < f_h$ ГГц, де $f_h = 30$ ГГц для RMa. Слід зазначити, що модель втрат на трасі RMa для діапазону, більше 7 ГГц перевіряється на основі єдиної системи вимірювань, що проводиться на частоті 24 ГГц. У даному моделюванні пакети передаються на центральній частоті 28 ГГц.

Вибрано значення з діапазонів застосовності для моделювання системи з БПЛА-БС з використанням цих рівнянь. БПЛА-БС в нашому моделюванні являє собою комбінацію літаючого UT та літаючого BS. Рекомендована висота UT (h_{UT}) становить від 1 до 10 метрів. Можлива висота БС h_{BS} становить від 10 до 150 метрів. Обрана висота БПЛА-БС h_p становить 10 метрів.

Для втрат на трасі прямої видимості (LOS) використовуються такі вирази PL:

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

де d_{2D} і d_{3D} - відстані між UT та BS у 2D та 3D (рисунок 3.2),

d_{BP} - відстань точки перелому,

h - середня висота будівлі (за замовчуванням 5 метрів),

W - середня ширина вулиці (20 метрів за замовчуванням).

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

$$PL_{RMa-NLOS} = \max(PL_{RMa-NLOS}, PL'_{RMa-NLOS})$$

Для $10m \leq d_{2D} \leq 5km$

$$PL'_{RMa-NLOS} = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2 (\log_{10}(11.75 h_{UT}))^2 - 4.97) \quad (3.2)$$

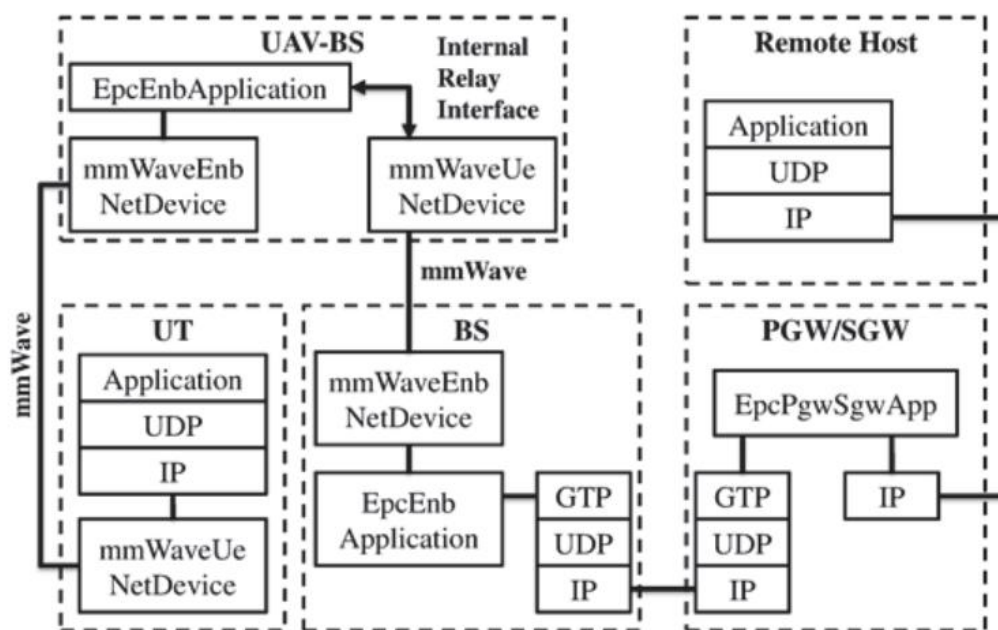


Рис. 3.3. Діаграма класів для моделі системи mmWave з БПЛА.

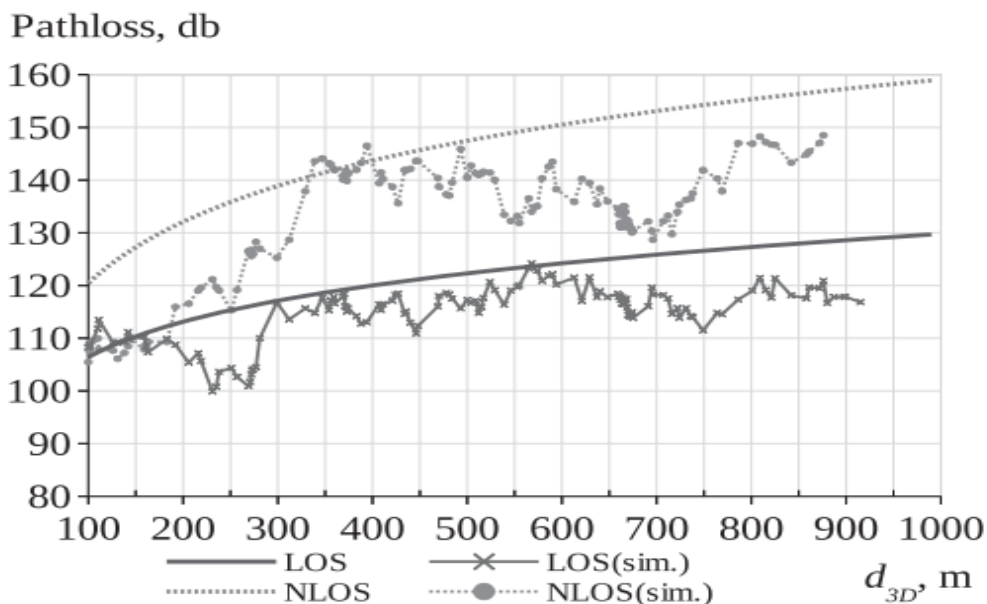


Рис. 3.4. Залежність втрат на трасі від відстані d_{3D} (Між BS та UT)

На малюнку 3.4 значення втрат на трасі в нашому моделюванні представлені для різних відстаней d_{3D} між BS та UT. Лінії без маркерів представляють аналітичні значення, засновані на рівняннях (1) і (2) для втрати шляху. Лінії з маркерами представляють миттєві значення втрат на трасі з моделювання в NS-3. При моделюванні ми вручну встановлювали умови каналу LOS і NLOS і переміщали UT від BS зі швидкістю 10 метрів в секунду. відстань d_{3D} між ними змінилося з 100 до 900 метрів.

В. Блокування

В системі mmWave сигнали легко блокуються перешкодами. У нашому моделюванні ми оцінюємо блокування невеликими рухомими перешкодами. Кожен блокатор являє собою кубоїд зі сторонами $0,5 * 0,5 * 1,8$ метра (ширина * глибина * висота). Кубоїд - грубе зображення людського тіла, яке може блокувати сигнали міліметрового діапазону. Ми моделюємо квадратну область з [90 ... 9000] людьми, щоб погіршити поширення сигналу для прямого маршруту між BS та UT. Блокатори переміщуються випадковим чином зі швидкістю 2 метри в секунду. Така модель може описувати скупченість людей на стадіоні, в парку або на музичному фестивалі. [50]

Параметри моделювання

Назва параметра	Значення
Несуча частота, ГГц	28
Номер антени UT	16
Номер антени BS	48
Сторона A, метри	[100..1000]
Транспортний рівень	UDP
Вихідні дані, Мбіт / с	≤ 100
Потужність Tx, дБм	20
Дрібномасштабне вицвітання	включено
UT висота, метр	1.5
Висота блокатора, метр	1.8
Ширина блокатора, метр	0.5
Щільність блокатора, ρ_{block} , 1 / м ² /	[0.001...0.1]
Модель мобільності блокатора	Random
Швидкість блокатора, метри в секунду	2
Час моделювання, секунди	60
BS висота hBS, метрів	10
Висота БПЛА-БС, метри	10

Аналізуємо площу квадрату зі стороною A від 100 до 1000 метрів. Співвідношення між кількістю блокуючих і розміром області і є щільність блокуючих ρ_{block} . Визначимо кількість блокуючих N_{block} під час моделювання з використанням рівняння:

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

де ρ_{block} - щільність блокаторів на площі в 1 м²,

D_{max} - максимальна відстань від BS в метрах (вона за замовчуванням аналогічна

стороні А),

D_{min} - мінімальна відстань від BS в метрах (за замовчуванням 10 метрів).

3.2 Моделювання передачі сигналу в системі міліметрового діапазону БПЛА-БС, та БПЛА-ретранслятор-БС

Ми порівнюємо два підходи до передачі даних в системах mmWave (з БПЛА-БП і без нього) за допомогою інструменту моделювання NS-3. Канали між вузлами моделюються на основі моделі розповсюдження 3GPP на центральній частоті 28 ГГц. UAV-BS використовується для ретрансляції пакетів від UT до BS. Ми розглядаємо два випадки: джерело-пункт призначення (SD) і джерело-ретранслятор-пункт призначення (SRD). [50]

А. Джерело-місце призначення

У разі джерела-призначення (SD) UT є джерелом S, а BS - пунктом призначення D. Джерело і пункт призначення є стаціонарними. UT знаходиться в точці з координатами (A, A, 1.5), де A - сторона площі квадрата. BS знаходиться в точці з координатами (0, 0, 10). Додаток в UT відправляє дані на віддалений хост в Інтернеті через локальну BS. Кожен пакет передається від UT до BS за допомогою системи mmWave, а потім маршрутизується об'єктом PGW / SGW в Інтернет.

Б. Джерело-ретранслятор-місце призначення

У разі «джерело-ретранслятор-пункт призначення» (SRD) UT є джерелом S, BS є пунктом призначення D, а ретранслятор R є проміжним UAV-BS в центрі області. У разі SRD UAV-BS може прозоро ретранслювати пакети від UT до BS. UT, BS і UAV-BS нерухомі і розташовані в точках з координатами (A, A, 1.5), (0, 0, 10) і (A / 2, A / 2, 10) відповідно.

Додаток в UT відправляє дані на віддалений хост в Інтернеті, і кожен пакет передається від UT до UAV-BS, а потім від UAV-BS до BS за допомогою каналів mmWave. У BS пакети направляються в Інтернет через об'єкт PGW / SGW. [50]

С. Показники якості обслуговування

Оцінюються ефективність схеми джерело - ретранслятор - пункт призначення (SRD) в системі mmWave з БПЛА-БС, використовуючи показники якості обслуговування (QoS): середня корисна пропускна здатність і виграш в корисною пропускну здатності. Середня корисна потужність ($Goodput_{ave}$) - це все корисне навантаження UDP, отримане віддаленим хостом під час моделювання, розділена на час моделювання:

$$Goodput_{ave} = buf * 8 / T, \quad (3.4)$$

де buf - розмір приймального буфера в байтах,

T - час моделювання в секундах.

Розрахування приросту корисної продуктивності ($G_{Goodput}$)

Як:

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

де $Goodput_{SRD}$ - середня корисна продуктивність для випадку джерело - ретранслятор - пункт призначення (SRD), $Goodput_{SD}$ - середня корисна продуктивність для випадку «джерело - місце призначення» (SD). [50]

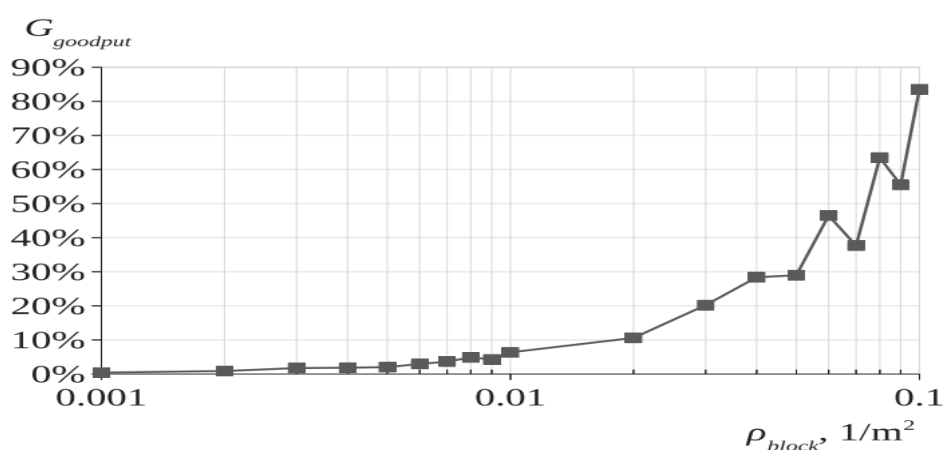


Рис. 3.5. Приріст корисної продуктивності ($G_{Goodput}$) Для різної щільності блокувальників ρ_{block} за сценарієм $A = 300$ метрів і БПЛА-БС в центрі

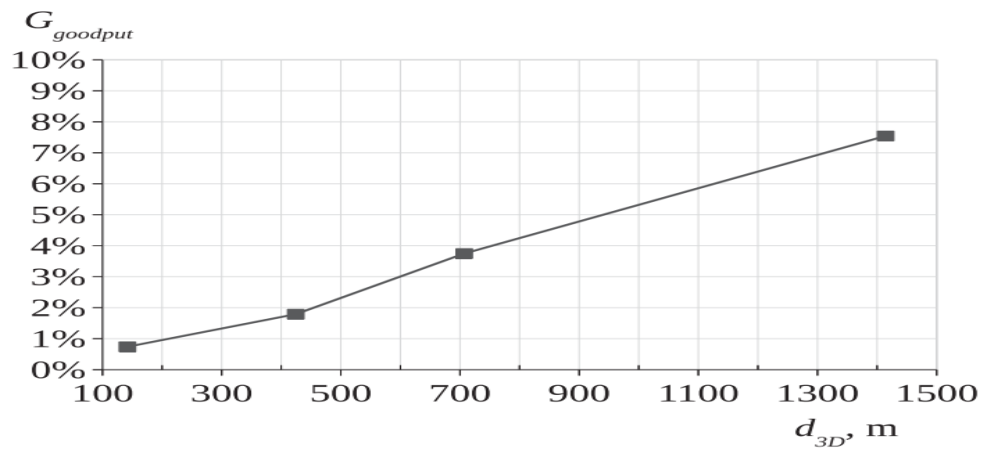


Рис. 3.6. Приріст корисної продуктивності ($G_{Goodput}$) Для різних відстаней d_{3D} в сценарії з БПЛА-БС в центрі

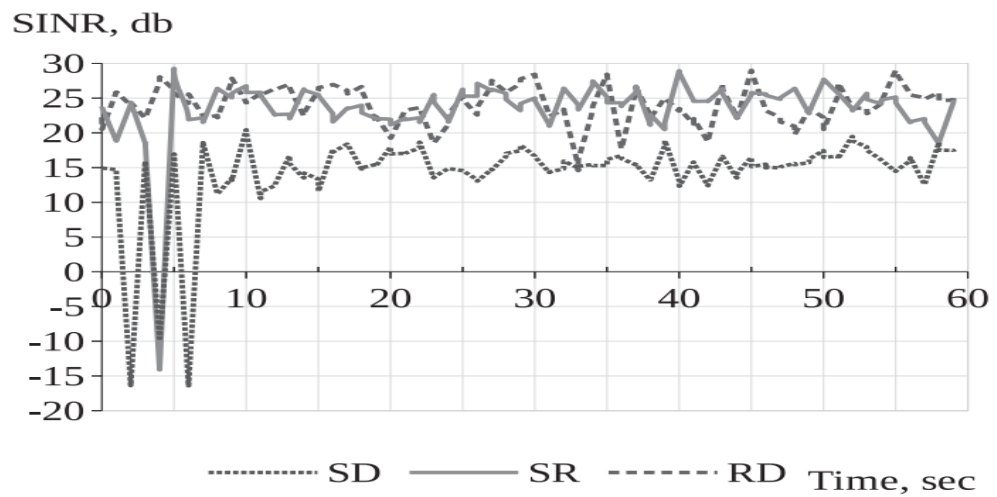


Рис. 3.7. Значення SINR для SD, SR та RD каналів ($\rho_{block} = 0,004$, $A = 300$)

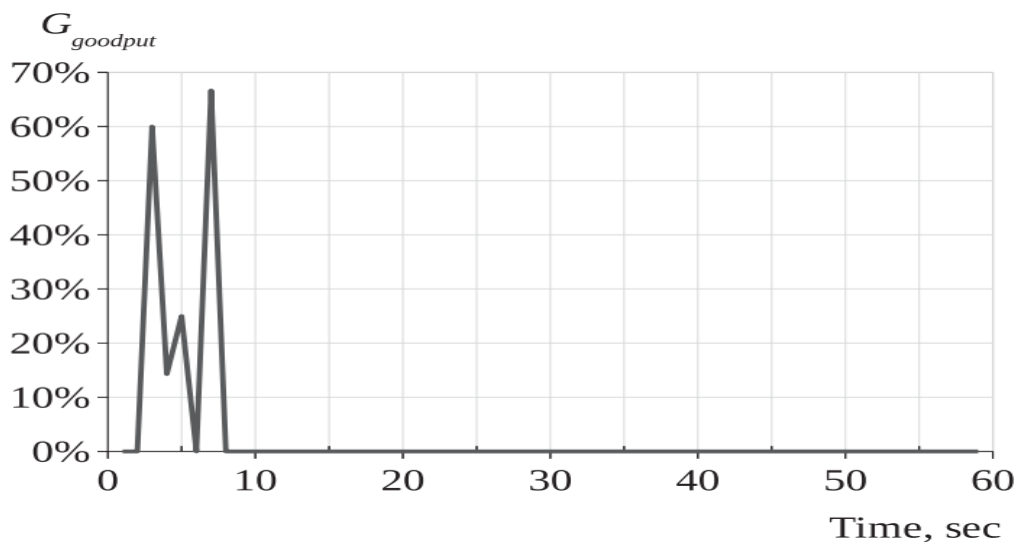


Рис. 3.8. Приріст корисної потужності під час моделювання ($\rho_{block} = 0,004$, $A = 300$)

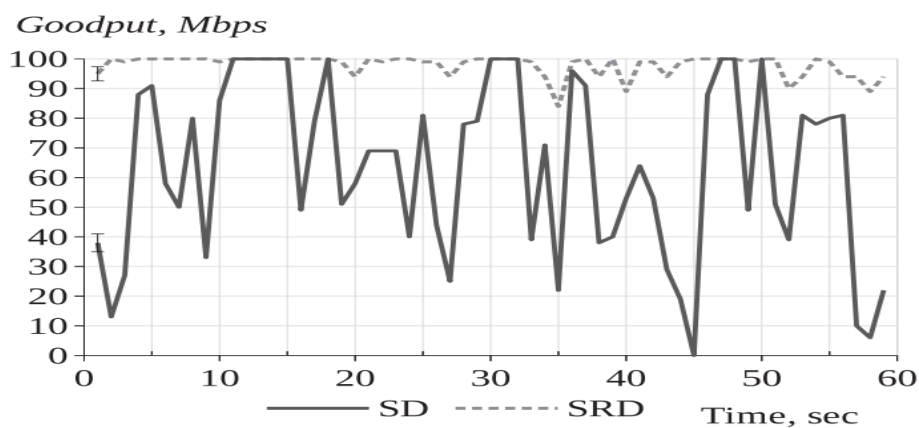


Рис. 3.9. Приклад значень хороших показників під час моделювання з високим блокуванням ($\rho_{\text{block}} = 0,04$, $A = 300$): SD - пряма передача від UT до BS; SRD - ретрансляція від UT до BS за допомогою БПЛА-BS.

Розраховано метрики QoS для кожного випадку окремо: з БПЛА-BS (випадок SRD) і без нього (випадок SD). Ми виміряли ці показники для швидкостей передачі даних 10 Мбіт / с і 100 Мбіт / с і щільності блокувальників від 0,001 до 0,1 блокувальників на м.². Було виконано 50 запусків для кожної модельованої точки. Тривалість кожного запуску складала 60 секунд.

3.3 Аналіз отриманих результатів

У змодельованих випадках показники наскрізного якості обслуговування (QoS) залежать від фізичного рівня через негативний вплив втрат на тракті і блокування. Вплив втрат на трасі тим більше, чим більше відстань між UT і BS. Ефект від блокування тим більше, чим вище щільність блокувальників ρ_{block} . [14],[12]

Основні результати представлені на рисунках 3.5 і 3.6. На рисунку 3.5 представлений взаємозв'язок між коефіцієнтом корисної пропускнуої спроможності і щільністю блокувальників. Сторона A становила 300 метрів під час всіх прогонів моделювання, а БПЛА-БП розташовувався в центрі зони. Щільність блокувальника 0,1 блокувальника м² визначає 8410 блокуючих для площі квадрата зі стороною $A = 300$. Більш висока щільність блокувальників призводить до

більшого $G_{Goodput}$. Корпус SRD забезпечує кращу середню продуктивність для всіх точок вимірювання. Найбільший приріст 83% був досягнутий при щільності 0,1 блокатора / м.². Найнижчий приріст 0% був при щільності 0,001 блокатора / м.². Це співвідношення можна лінійно апроксимувати методом найменших квадратів як:

$$G_{goodput} = 7.17 \rho_{block} - 0.006, \quad (3.6)$$

Згідно наближенню (6) більш високі щільності викличуть ще більший виграш для випадку SRD. Такий виграш викликаний відключеннями через блокування рухомими перешкодами. [50]

На рис. 3.6 представлена залежність коефіцієнта посилення $G_{Goodput}$ на відстані d_{3D} між UT і BS. Більш висока відстань d_{3D} призводить до більшого посилення для випадку SRD. Наприклад, коефіцієнт посилення для сценарію з $A = 100$ метрів і $d_{3D} \approx 141$ метр нижче 1%. Цієї відстані занадто мало, щоб продемонструвати будь-який виграш від ретрансляції через БПЛА-БП. Але виграш становить 7,5% для тієї ж щільності блокуючих, коли $A = 1000$ метрів і $d_{3D} \approx 1414$ метрів.

На рисунках 3.7 і 3.8 показана залежність наскрізної метрики QoS $G_{Goodput}$ на метриці фізичного рівня SINR. На рис 3.7 SINR для каналу SD між UT і BS становить близько 15 дБ. Значення SINR для передачі як по каналу SR (від UT до UAV-BS), так і по каналу RD (від UAV-BS до BS) складають близько 25 дБ. але $SINR_{SD}$ набагато гірше, ніж $SINR_{RD}$ на шостій секунді. $SINR_{SR}$ знизився до стану відключення одночасно з $SINR_{SD}$. На рис. 3.8 видно, що випадок SRD дає миттєве значення $G_{Goodput}$ до 60% під час моделювання. Але в 6th другий коефіцієнт посилення $G_{Goodput}$ близький до нуля. [50]

На рис. 3.9 представлено миттєві значення корисної продуктивності для іншого прогону моделювання. У всіх модельних точках випадок SRD демонструє стійкий виграш. Наприклад, на 9-й секунді $Goodput_{SD} \approx 33$ Мбіт / с і $Goodput_{SRD} \approx 100$ Mbps.

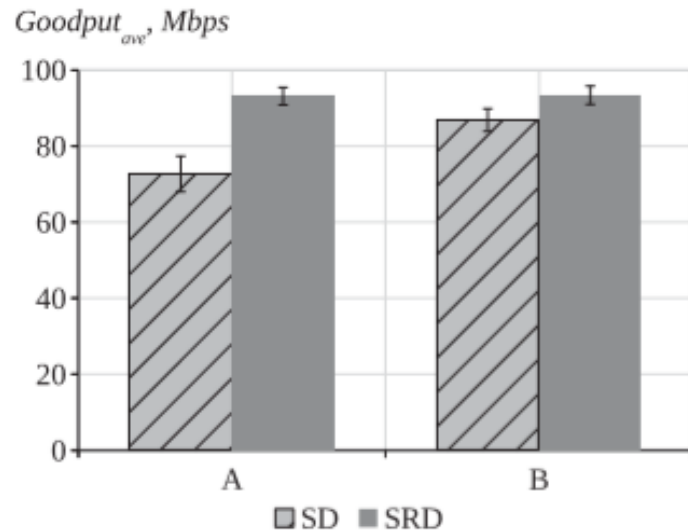


Рис. 3.10.

Середня корисна продуктивність для випадків SRD та SD: а) $A = 300$ метрів, $\rho_{block} = 0,04$, положення реле (150,150,10); б) $A = 1000$ метрів, $\rho_{block} = 0,004$, положення реле (500,500,10).

Розраховано середні значення корисної продуктивності протягом 50 прогонів моделювання. На рисунку 3.10 представлена середня корисна пропускна здатність для передачі з БПЛА-БС (SRD) і без нього (SD). БПЛА-БС знаходиться посередині майданчика. У лівій частині малюнка розглядається висока засміченість ($\rho_{block} = 0,04$, $A = 300$ м) а коефіцієнт посилення становить близько 30%. У правій частині малюнка засмічення невисокий ($\rho_{block} = 0,004$, $A = 1000$ метрів середня корисна пропускна здатність становить близько 95 Мбіт / с для випадку SRD і 85 Мбіт / с для випадку SD, а коефіцієнт посилення $G_{Goodput}$ становить близько 7,5% [50]

ВИСНОВКИ

В цій роботі проаналізовано нещодавні напрацювання дослідників у сфері застосування БПЛА в безпроводових мережах 5G. Виявлено, що дана технологія є актуальним рішенням для багатьох поставлених проблем, завдяки особливостям конструкцій різних БПЛА. На сьогоднішній день ще існує багато відкритих питань, які потрібно буде вивчати в мабутньому.

Досліджено можливість застосування БПЛА в системах міліметрового діапазону для організації зв'язку на місцевостях, для яких характерне значне скупчення народу. За допомогою інструменту моделювання NS3, було виконано моделювання двох сценаріїв: підключення абонентський термінал-базова станція та абонентський термінал-ретранслятор-базова станція. Ретранслятор та базова станція реалізовані в якості БПЛА.

Отримано результат моделювання, який показав, що використання ретранслятора в зазначеному випадку є доцільним, оскільки в випадку без ретранслятора показник корисної продуктивності знижується за рахунок завад у вигляді густого скупчення людей на місцевості.