

УДК 621.396:629.735

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.062127

Д. В. ПОПЛАВСЬКИЙ¹, магістр;Д. В. СОРОКІН², доктор філософії, начальник Зв'язку штабу,¹ Державний університет телекомунікацій, Київ² Військова частина Т0930

УПРОВАДЖЕННЯ МОДЕЛІ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6-го ПОКОЛІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНИКІВ

Розглянуто варіант упровадження мережі на базі технології мобільного зв'язку 6G, що знаходиться в розробленні. Але зараз безпілотники не мають істотного запасу енергії у своїх акумуляторах, через що обмежується продуктивність і безпілотникам доводиться спускатися на землю для підзарядження. Тому запропоновано впровадження за допомогою тросових БПЛА (тБПЛА), щоб не лишати зону покриття тБПЛА без сигналу. Отже, пропонується установка, яку буде підімкнено до наземної станції за допомогою тросу, через який до тБПЛА надходитиме живлення і дані, що може забезпечити політ до кількох днів. Описано порівняння між тБПЛА і неприв'язаними безпілотниками (БмПЛА). Проаналізовано потенційні застосування (приклад Монте-Карло, де розглядається продуктивність між тБПЛА і БмПЛА), з огляду на покриття, де тБПЛА, що доступний 70% часу, де 30% недоступний через технічний огляд/ремонт. Тут результати моделювання показують, що тБПЛА з 120 м довжиною тросу може забезпечити до 30% збільшення ймовірності охоплення порівняно з БмПЛА. Сформульовано виклики, міркування щодо дизайну та майбутні напрямки досліджень для реалізації запропонованої моделі.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА); безпілотний неприв'язаний літальний апарат (БмПЛА); тросовий безпілотний літальний апарат; базові станції; наземна станція; Інтернет речей; поширення в прямій видимості; макробазові станції; повітря-земля; оптичний зв'язок у вільному просторі; капітальні витрати; операційні витрати; процес точки Гуассона.

Вступ

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поточні можливості наземної мережі ще далекі від того, щоб задовольнити вимоги 6G для глобального покриття. Потрібна широкомасштабна мережа, яка також може інтегрувати неназемні мережі для підтримання різноманітних застосувань, зокрема польоти та мореплавство. Архітектура 6G буде безстільниковою, великою за розмірами та чотирирівневою. Рівні мережі охоплюють космічну, повітряну, наземну та підводну мережі (рис. 1) [1]. Наприклад, з рівнем космічної мережі послуги космічного інтернету (які можуть бути критично важливими для космічних подорожей) будуть у зоні покриття завдяки супутникам [2]. Для наземного рівня буде забезпечено передавання даних з терабітною швидкістю для збільшення зони покриття 6G з використанням терагерцових частотних діапазонів. Отже, частота буде зростати, зумовлюючи збільшення втрат на шляху. Діапазон 6G буде меншим, ніж у нинішніх поколіннях. У цьому разі потрібно буде використовувати більшу кількість базових станцій, що зробить мережу 6G значно більш переповненою та щільною.

З використанням 5G концепція мереж IoT належить до мільярдів інтелектуальних пристроїв, які об'єднують системи, людей та інші програми для збору та обміну даними. З 6G ця концепція розшириться та розвинеться до контролю та реагуванню в реальному часі, не обмежуючись виявленням з'єднання та зв'язку. «Тактильний Інтернет» описує виявлення в реальному часі, контроль, доступ



Рис. 1. Архітектура 6G

та роботу віртуальних об'єктів, як визначено стандартом IEEE 1918.1 [3]. Через поточні обмеження ресурсів і детекторів терагерцовий спектральний діапазон використовується не повністю. Фотонні рішення були передовою технологією, які, як очікується, дадуть цьому діапазону частот бути застосовним у різні способи. Фотонні методи є бажаним рішенням для виробництва міліметрових хвиль і ТГц з погляду енергоефективності, пропускної здатності та діапазону регулювання. Методи генерації частот терагерцових, засновані на методах фотонного гетеродинного змішування, можуть подолати обмеження пропускної здатності електричних компонентів, а також ефективно сприяти бездоганній інтеграції оптоволоконного

© Д. В. Поплавський, Д. В. Сорокін, 2022

та безпроводового мережного зв'язку. Це зробить систему потокового зв'язку волоконно-терагерцово-волоконну перспективним вибором [4; 5]. Системи зв'язку у видимому світлі (VLC) важливі для 6G. VLC працює в діапазоні частот від 400 до 800 ТГц. На відміну від радіочастотних технологій, які використовують антени в діапазоні низьких терагерцових, зв'язок у видимому світлі покладається на джерела світла (зокрема на світлодіоди, давачі зображення або матриці фотодіодів) для зв'язку з трансиверами. У кількох неземних сценаріях, зокрема авіації чи морських програмах, зв'язок у видимому світлі перевершує радіочастотні технології щодо продуктивності поширення.

Основна частина

Вважається, що базові станції (БС) безпілотників є невід'ємною частиною стільникової архітектури 6G [6; 7]. Притаманна гнучкість переміщення та відносна легкість розгортання можуть бути корисними для багатьох вимог стільникових мереж наступного покоління, таких як забезпечення покриття в гарячих точках і в районах із дефіцитною інфраструктурою, зокрема середовищах відновлення після аварій або сільських районах. Висока ймовірність установлення лінії поширення в прямій видимості (ПвПВ) із наземними користувачами через велику висоту зумовлюють більш надійні канали зв'язку та ширшу зону покриття [8; 9]. Потенційні випадки використання бортових БС включають розвантаження макробазових станцій (МБС) у міських і густонаселених районах і забезпечення покриття для сільських районів, які зазвичай страждають від низького стільникового покриття через відсутність стимулів для операторів.

Ці потенційні переваги бортових БС спонукали дослідницьке співтовариство до вивчення багатьох аспектів стільникових мереж із підтриманням БПЛА, таких як характеристики каналу повітря-земля (ПЗ), оптимальне розміщення БПЛА та оптимізацію траєкторії [10]. Крім того, існують дві ключові проблеми в процесі проектування систем із підтриманням БПЛА, які будуть розглянуті більш детально у цій статті. По-перше, це обмежені енергетичні ресурси, доступні на борту, що робить час польоту менше однієї години в більшості комерційно доступних БПЛА [11; 12]. Другою ключовою проблемою проектування є безпроводове зворотне з'єднання [13].

Зазвичай енергоспоживання БПЛА є подвійним: рушійна енергія, яка є енергією, що споживається БПЛА для польоту та зависання, та енергія корисного навантаження, яка фіксує споживання енергії для зв'язку та оброблення на борту. Багато дослідницьких праць було спрямовано на розроблення енергоефективних схем зв'язку

для БПЛА з метою подовження терміну їх служби. Однак, оскільки рушійна енергія значно більша за енергію корисного навантаження, енергоефективне спілкування не сильно вплине на час польоту. Така коротка тривалість польоту може не бути проблемою для деяких випадків використання, таких як доставляння за допомогою дронів між сусідніми місцями або поширення та збір даних із сенсорних мереж. Проте, коли справа доходить до встановлення БПЛА, більший час польоту є життєво важливим для забезпечення стабільного та безперебійного стільникового зв'язку.

На відміну від наземних базових станцій, які мають проводові канали зв'язку (зазвичай із використанням оптоволоконних кабелів), БПЛА покладаються на безпроводові канали зв'язку. Порівняно з проводовими з'єднаннями безпроводові зворотні з'єднання чутливі до вищої затримки, завад і нижчої досяжної швидкості передавання даних. Отже, важливо знайти найкращу технологію для встановлення безпроводового зворотного зв'язку на БПЛА [14]. Доступні рішення в статті охоплюють: супутниковий зв'язок, зв'язок на міліметрових хвилях, оптичний зв'язок у вільному просторі (ОЗВП) і внутрішньосмуговий транзитний зв'язок. Кожне з цих чотирьох рішень має свої переваги і недоліки. Наприклад, супутниковий зв'язок забезпечує більш надійний транзитний зв'язок, але страждає від більшої затримки. Водночас міліметрові хвилі і ОЗВП забезпечують набагато вищу швидкість передавання даних порівняно з внутрішньосмуговим зв'язком. Однак, обидва рішення мають високу вразливість до блокування і є надійними лише на невеликих відстанях. У сучасній літературі найбільше уваги приділяється використанню внутрішньосмугового транзитного зв'язку. Це рішення має меншу затримку порівняно з супутниковим бекхаузом. Воно не потребує каналу ПвПВ для ефективного зв'язку, як міліметрові хвилі або ОЗВП. Проте, через велику висоту польоту БПЛА, він страждає від більш високих рівнів завад, що може значно знизити досяжну швидкість транзитного зворотного зв'язку. У цій статті пропонується налаштування системи на основі прив'язаних БПЛА (тБПЛА). Запропонована технологія вирішує дві технічні проблеми, описані раніше: короткий час польоту через обмежену бортову енергію та встановлення надійного зворотного зв'язку. Інтерфейс між БС і тБПЛА складається з двох компонентів: енергопостачання та канал передавання даних. Енергопостачання здійснюється від БС до тБПЛА через проводове з'єднання, що дає змогу тБПЛА підтримувати набагато більший час польоту. Так само канал передавання даних між БС і тБПЛА також є фізичним за допомогою оптоволоконного зв'язку, що забезпечує надійний зв'язок на висо-

кій швидкості передавання даних між тБПЛА і базовою станцією. Як дріт для живлення, так і дані об'єднані всередині прив'язки. Нині наявні у продажу БПЛА можуть залишатися в повітрі безперервно протягом кількох днів, маючи доведену здатність витримувати суворі погодні умови. Через свою вагу довжина троса зазвичай обмежена і становить від 80 до 150 м [14]. Недавній випадок у Пуерто-Ріко розгорнули БПЛА для забезпечення стільникового зв'язку для постраждалих регіонів після урагану Марія [15].

Основним недоліком тБПЛА є обмежена довжина троса, що обмежує мобільність і гнучкість переміщення безпілотника. Отже, природно виникає компроміс між БмПЛА і тБПЛА. З одного боку, тБПЛА має набагато більший час польоту порівняно з БмПЛА завдяки стабільному живленню через трос. Однак він може зависати або переміщатися лише в обмеженому просторі, визначеному довжиною троса і оточенням об'єкта спостереження. З другого боку, БмПЛА має повну свободу переміщатися в будь-якому місці, щоб максимізувати продуктивність мережі. Однак, через обмежену ємність бортового акумулятора він змушений регулярно переривати свою роботу, щоб підзарядити або замінити батарею. На жаль, сьогодні ми не маємо технології, яка може забезпечити тривалий час польоту із збереженням вільної мобільності.

Запропонована система складається з трьох основних компонентів (рис. 2):

- БПЛА,
- трос,
- наземна станція (НС).

БПЛА розміщується в ретельно вибраному місці, яке задовольняє дві умови: має надійне з'єднання з основною мережею і має стабільне джерело живлення, наприклад під'єднання до мережі або генератор. Ці два з'єднання (джерело живлення та основна мережа) простягаються до БПЛА за допомогою троса. Отже, трос забезпечує безперебійне енергопостачання БПЛА, що дає змогу йому залишатися в робочому стані зі значно більшим часом польоту. Крім того, трос також з'єднує БПЛА з основною мережею за допомогою

проводового з'єднання, забезпечуючи стабільний, надійний і безпечний зворотний зв'язок. БПЛА може зависати лише в межах певного діапазону, який загалом залежить від довжини троса. Якщо припустити, що НС, яка є точкою запуску тБПЛА, розміщена на даху, то тБПЛА може зависати навколо даху в межах усіченої півсфери радіусом, еквівалентним довжині троса, з центром на даху (див. рис. 2). Загальна зона, в якій може зависати БПЛА, обмежена висотою сусідніх будівель. Для визначення досяжних тривимірних (3D) локацій для даного середовища можуть бути застосовані методи планування руху [16]. Далі в цій статті ця зона буде зватися зоною зависання. тБПЛА несе на собі антени і набір обчислювальних блоків. Ці обчислювальні блоки з'єднані з НС через оптичне волокно, що передає дані вздовж троса. Хоча антени і процесорні блоки вважаються важкими компонентами для типових БПЛА, сучасні комерційні системи здатні нести до 60 кг додаткового корисного навантаження [17]. БПЛА має зависати в межах зони зависання і відшукувати оптимальне 3D-розташування, яке максимізує покриття стільникового зв'язку для наземних користувачів. Окрім свого основного завдання — забезпечення з'єднання з основною мережею та енергоресурсом, НС відповідає за контроль троса. Зокрема, НС повинен контролювати натяг троса і гарантувати, що він завжди натягнутий. Під час руху тБПЛА НС має відчувати чи потребує тБПЛА випускання троса більшої довжини для того, щоб досягти місця призначення, або втягування додаткової довжини для забезпечення натягу троса [18; 19]. З наведених раніше міркувань зрозуміло, що розумний вибір місця розташування НС має велике значення для продуктивності системи тБПЛА. Наприклад, розміщення НС на даху, оточеному з усіх боків високими будівлями, зменшить зону його зависання майже до зони над власним дахом. Менша зона зависання призводить до більш складної проблеми 3D-розміщення БПЛА і обмежує мобільність БПЛА. У процесі вибору місця розташування НС потрібно зважати на багато аспектів, зокрема просторовий розподіл попиту на трафік

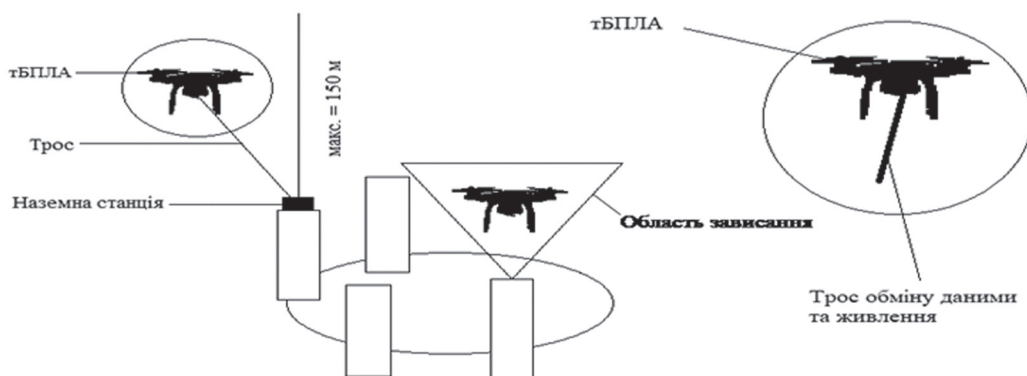


Рис. 2. тБПЛА в міських умовах

і наявність необхідної інфраструктури. Крім продуктивності, під час проектування системи БПЛА слід брати до уваги економічну ефективність. Існують певні відмінності з погляду капітальних витрат (КВ) і операційних витрат (ОВ) між тБПЛА і БмПЛА. Капітальні інвестиції, які існують лише в системах тБПЛА, загально пов'язані з тросом і його механічним контролером та наземною станцією. Водночас капітальні інвестиції, які існують лише в БмПЛА, пов'язані із зарядними станціями, потрібними для підзарядження/заміни акумуляторів БмПЛА. Проте операційні витрати, які існують лише в системах тБПЛА, в основному стосуються оренди дахів, які використовують для розміщення наземної станції.

Далі за допомогою моделювання Монте-Карло буде показано компроміс між тБПЛА та БмПЛА з погляду необмеженої мобільності з обмеженим часом польоту для БмПЛА та обмеженої мобільності з необмеженим часом польоту для тБПЛА. Спочатку розглядатимемо налаштування системи, що складається з МБС, кластера користувачів і БПЛА, розгорнутого для обслуговування цього кластера користувачів і розвантаження МБС. Розташування користувачів рівномірно розподілено всередині кластера радіусом 100 м. У разі використання БмПЛА ми припускаємо, що він зависає в центрі кластера для максимального покриття. Однак через обмеження батареї БмПЛА має залишити місце розташування в повітрі та летіти назад до зарядної станції, щоб зарядити/замінити батарею. Протягом цього часу користувачі обслуговуються лише МБС. Отже, ми представляємо доступність БмПЛА як частку часу, коли він фактично працює. Водночас у разі використання тБПЛА ми припускаємо, що він має необмежений час польоту. Однак його рухливість обмежена тросом з'єднання його з МБС довжиною 120 м, аналогіч-

но специфікаціям тБПЛА [20]. Отже, тут ми припускаємо, що НС тБПЛА є МБС. На рис. 3 можна спостерігати, що в разі наявності безпілотної з доступністю 1 ми матимемо найкраще можливе покриття.



Рис. 3. Імовірність покриття під час використання тБПЛА або БмПЛА для різних значень відстані між МБС і центром кластера

У цьому моделюванні розглядається один круглий кластер користувачів, причому користувачі рівномірно розподілені всередині диска радіусом 100 м. Доступність БмПЛА визначає частину часу, протягом якого БмПЛА працює, а решту часу він заряджає/замінює батарею. БПЛА з'єднаний із МБС через трос довжиною 120 м [20]. Порівнюються три сценарії: сценарій 1, коли використовується БмПЛА і основним обмеженням є його доступність, сценарій 2, коли використовується тБПЛА та розміщується в оптимальному місці в зоні зависання і сценарій 3, це коли БПЛА розміщено безпосередньо над його НС (оптимальне розміщення не розглядається) (рис. 4).

Як уже зазначалося, у цьому моделюванні (див. рис. 4) вивчається охоплення рівномірно розподілених користувачів у межах диску радіусом 100 м.

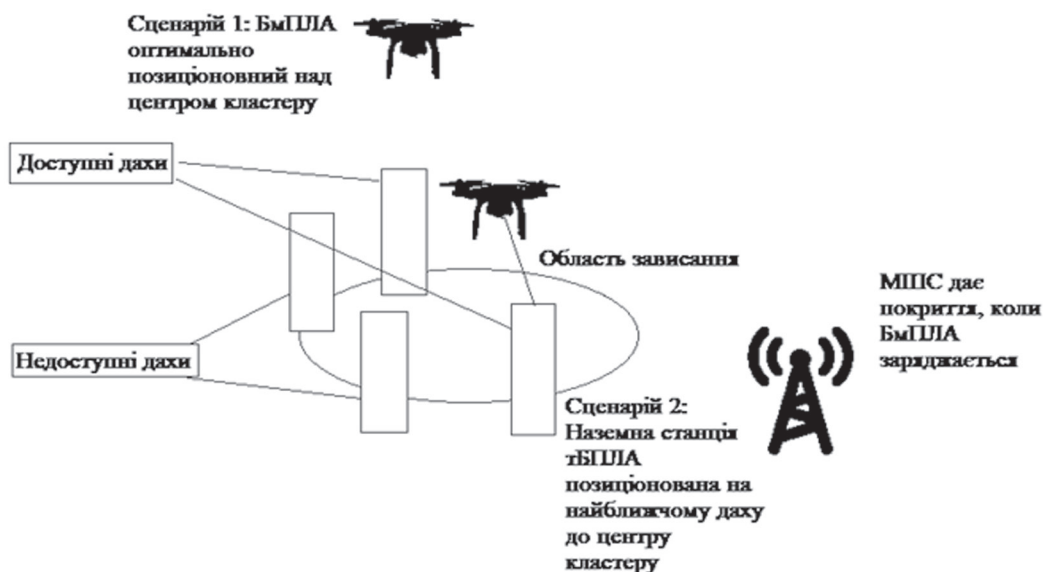


Рис. 4. Налаштування системи для рис. 5



Рис. 5. Ймовірність покриття для різних значень доступності БмПЛА, максимальної довжини траса та доступності дахів

МБС знаходиться в 160 м від диска-центра. НС тБПЛА розміщується на найближчому доступному даху до центра диска. Доступність дахів визначає частку будівель, де дозволено розгортати НС. Щільність забудови 500 будівель/км². Порівнюються два сценарії: сценарій 1, коли використовується БмПЛА і основним обмеженням є його доступність, сценарій 2, коли використовується тБПЛА, а БС розміщується на найближчому доступному даху до центра кластера.

У разі готовності 0,8 тБПЛА перевершує БмПЛА, якщо відстань між МБС і центром кластера менша за 193 м. Цей поріг збільшується, коли доступність БмПЛА зменшується.

На рис. 5 також порівнюється продуктивність тБПЛА для двох сценаріїв розгортання: тБПЛА зависає точно над НС з максимально розтягнутим тросом і тБПЛА розміщено в оптимальному місці в межах своєї зони зависання, що максимізує ймовірність покриття. Результати показують важливість оптимального розміщення тБПЛА. Проблема оптимізації розміщення тБПЛА відрізняється від типових проблем 3D-розміщення БмПЛА, які описуються у статті. Загалом це пов'язано з обмеженою мобільністю тБПЛА, що зменшує його доступність у 3D-локаціях. Потрібно зауважити, що ця проблема розміщення відрізняється від сценарію встановлення максимально допустимої висоти для БмПЛА. Для останнього БмПЛА може зависати будь-де, якщо він підтримує свою висоту нижче заданого значення, чого не можна сказати про тБПЛА.

Як зазначалося раніше, НС не обов'язково має бути МБС. Він може бути дахом будь-якої будівлі, якщо він має доступ до стабільного енергоресурсу та надійне з'єднання з основною мережею. Очевидно, що цим умовам не завжди задовольняє будь-яка навмання вибрана будівля. Крім того, не кожна будівля, що задовольняє ці умови, надасть оператору доступ для розгортання своєї НС на даху. Отже, для заданої щільності будівель вводиться доступність дахів як відношення будів-

вель, які задовольняють згаданим раніше умовам і готові надати доступ до своїх дахів. Розглядається схожа установка, як на рис. 6, з розгортанням НС на найближчому доступному даху до центра кластера, замість того, щоб розгортати його на МБС. Крім того, фіксується відстань між МБС і центром кластера 160 м. Моделюється розташування будівель за допомогою процесу точки Пуассона (ПП) із щільністю 500 будівель/км², що є типовою щільністю забудови в міських районах. На рис. 5 порівнюються характеристики тБПЛА та БмПЛА для різних значень доступності дахів. Спостерігається, що мінімально необхідна доступність на даху, щоб тБПЛА перевершив БмПЛА, зменшується, коли збільшується довжина траса. Наприклад, коли доступність становить 0,9, необхідна доступність дахів зменшується з 0,25 до 0,05, оскільки збільшується максимальна довжина траса з 80 до 120 м. Цей результат показує вплив максимальної довжини траса на продуктивність системи. З огляду на те, що доступність дахів становить важливу частину капітальних витрат системи, ці результати показують, що збільшення максимальної довжини траса дійсно важливо для економічно ефективного розгортання тБПЛА.

Ускладнення з моделлю розгортання тБПЛА полягають у такому. По-перше, оскільки повітряні системи зв'язку загалом потребують нової регуляторної політики, то системи тБПЛА можуть потребувати деяких особливих міркувань. Наприклад, нові правила безпеки мають бути впроваджені для зон, де дозволено простягати траси. Запас міцності навколо будівель і над землею, щоб уникнути нещасних випадків через заплутування або будь-яких зловмисних спроб переплутати трос.

По-друге, на відміну від типових досліджень з оптимізації розміщення БмПЛА, проблема розміщення тБПЛА відрізняється. Під час роботи кожен тБПЛА має бути фізично з'єднаний із НС на даху за допомогою траса. Отже, проблема є більш обмеженою і потребує ретельного вивчення. Проблема вибору даху може бути вирішена за допомогою різних підходів залежно від основних цілей оператора щодо якості обслуговування. На додаток до міркувань, пов'язаних із покриттям стільникового зв'язку, слід також брати до уваги економічну ефективність під час процесу вибору даху.

По-третє, з огляду на місце, вибране для розміщення НС, важливо точно знати, який вигляд має зона зависання. Враховуючи обмеження, пов'язані з тим, щоб не зачепити сусідні будівлі, забезпечити достатню віддаленість від громадського доступу та створити запас міцності над усіма навколишніми будівлями для забезпечення безпеки, зона зависання на кожному даху є насправді унікальною. Наприклад, якщо дах з усіх боків оточе-

ний нижчими будівлями, він матиме більшу зону польоту, а отже, більшу свободу пересування для тБПЛА. Зона зависання залежить від відстані до навколишніх будівель та їх відносної висоти. Для того, щоб розв'язати задачу 3D-оптимізації розміщення тБПЛА, спочатку необхідно отримати аналітичну модель для зони зависання.

Висновки

У статті було розглянуто потенціал тБПЛА для покриття стільникового зв'язку та збільшення потужності. Запропоновану установку можна розглядати як компроміс, який має на меті замінити поточні обмеження продуктивності БмПЛА через обмежену бортову енергію обмеженнями мобільності через тросове з'єднання. Було показано, що системи тБПЛА мають багатообіцяючі переваги порівняно з БмПЛА, незважаючи на обмеження мобільності, пов'язані з тросом. Було описано деякі потенційні випадки використання та застосування, де БС встановлена на тБПЛА, буде мати велику користь, наприклад, збільшення пропускної здатності в міських районах, розширення покриття в сільській місцевості та ущільнення мережі. Нарешті, було визначено деякі відкриті та дослідницькі проблеми, які потрібно ретельно проаналізувати, щоб краще зрозуміти обмеження продуктивності запропонованої установки.

Список використаної літератури

1. **6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies** / Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Xiao [et al.] // *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2019. 14. P. 28–41.
2. **Space-air-ground integrated network: a survey** / J. Liu, Y. Shi, Z.M. Fadlullah, N. Kato // *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2018. 20. P. 2714–2741.
3. **Zhao Y., Yu G., Xu H.** 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies, *arXiv preprint arXiv: 1905.04983*, 2019.
4. **Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts** / X. You, C.-X. Wang, J. Huang [et al.] // *China Information Sci.*, 2021. 64. P. 1–74.
5. **Performance enhancement of SCM/WDM-RoF-XGPON system for bidirectional transmission with square root module** / B. J. Hamza, W. K. Saad, I. Shaiya [et al.] // *IEEE Access*. 2021. 9. P. 49487–49503.
6. **Saad W., Bennis M., Chen M.** A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems // *IEEE Network*, 2020. Vol. 34. №3. P. 134–142.
7. **What should 6G be?** / S. Dang, O. Amin, B. Shihada, M.-S. Alouini // *Nature Electronics*. 2020. Vol. 3. №1. P. 20–29.
8. **Zeng Y., Zhang R., Lim T. J.** Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportuni-

ties and challenges // *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54. №5. P. 36–42.

9. **Bor-Yaliniz I., Yanikomeroglu H.** The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells // *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54. №11. P. 48–55.

10. **Wu Q., L. Liu, Zhang R.** Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for UAV-enabled wireless network // *IEEE Wireless Communications*. 2019. Vol. 26. №1. P. 36–44.

11. **Galkin B., Kibilda J., DaSilva L. A.** UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime // *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57. №6. P. 132–137.

12. **Energy neutral internet of drones** / T. Long, M. Ozger, O. Cetinkaya, O. B. Akan // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. №1. P. 22–28.

13. **FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks** / M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, M.-S. Alouini // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. №1. P. 218–224.

14. **Kishk M. A., Bader A., Alouini M.-S.** On the 3-D placement of airborne base stations using tethered UAVs // *IEEE Transactions on Communications*.

15. **AT&T, “AT&T’s First Official Deployment of Cell On Wings In Puerto Rico”, 2017.** URL:

https://about.att.com/inside_connections_blog/flying_cow_puertori

16. **Motion planning for a UAV with a straight or kinked tether** / X. Xiao, J. Dufek, M. Suhail, R. Murphy // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018. P. 8486–8492.

17. **Performance studies of narrow-beam trisector cellular systems.** URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/683677>.

18. **Nicotra M. M., Naldi R., Garone E.** Taut cable control of a tethered UAV // *IFAC Proceedings Volumes*, 2014. Vol. 47. №3. P. 3190–3195.

19. **Zikou L., Papachristos C., Tzes A.** The power-over-tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis // *23-rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2015. P. 681–687.

20. **Tethered UAV, “Feasibility study for the propulsion system of a tethered UAV.** 2018-2019. URL:

<https://webthesis.biblio.polito.it/11352/1/tesi.pdf>

D. V. Poplavskyi. D. V. Sorokin

IMPLEMENTATION OF A MODEL FOR DEPLOYING 6TH GENERATION MOBILE NETWORKS USING DRONES

In this article, options will be considered for implementing a network based on 6G mobile communication technology, which is currently under development. But, due to the fact that at the moment, drones do not have a significant energy reserve in their batteries, which limits productivity, and therefore, drones will have to go down to the ground to recharge. Therefore, it will be proposed to implement the use of tethered UAVs, hereinafter referred to as tUAVs, in order not to leave the area covered by tUAS without a signal. Thus, a system is proposed that will be connected to a ground station, hereinafter referred to as the GS, using a cable through which power and data will be supplied to the UAV, which can provide flight for up to several days. A comparison between the tethered UAV and unmanned aerial vehicles (UAVs) will also be described. In addition, potential applications will be described, with a Monte Carlo example looking at the performance between a tUAV and a uUAV, considering coverage where the tUAV is available 70% of the time and 30% is unavailable due to maintenance/repair. Here, the modelling results show that a tethered UAV with a 120 m tether length can provide up to a 30% increase in coverage probability compared to a UAV. Finally, challenges, design considerations, and future research directions for implementing the proposed model are described.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); unmanned untethered vehicle (uUAV); tethered unmanned aerial vehicle; base stations; ground station; Internet of Things; line-of-sight propagation; macro base stations; air-to-ground; free space optical communication; capital cost; operating cost; Poisson point process.

