

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-42>

УДК 621.396

Жуга Юрій Сергійович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0007-6508-8831>

Білик Олександр Сергійович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0007-4846-1585>

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

ТРОПОСФЕРНИЙ ЗВ'ЯЗОК З БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРОМ: ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ ТА ВАЛІДАЦІЯ НА SDR

Жуга Ю. С., Білик О. С. Тропосферний зв'язок з БПЛА-ретранслятором: вплив метеорологічних умов та валідація на SDR. У роботі розглянуто можливості використання безпілотних літальних апаратів як висотних ретрансляторів для тимчасового розгортання мережі тропосферного зв'язку в надзвичайних умовах. Проаналізовано сучасні підходи до організації далекого радіозв'язку та окреслено їх обмеження. Запропоновано концепцію гібридної системи на частоті 5 ГГц з БПЛА на висоті 200-1000 м, що поєднує переваги тропосферного розсіювання та прямої видимості. Розроблено методику оцінки впливу опадів, туману та снігу на максимальну дальність зв'язку, що ґрунтується на енергетичному балансі лінії. Результати моделювання порівняно з експериментальними даними, отриманими на навчальному макеті LTE на базі SDR-платформи LimeSDR. Показано, що помірний дощ зменшує дальність майже вдвічі, але збільшення висоти БПЛА частково компенсує втрати. Запропоновано рекомендації щодо адаптивної роботи системи в різних метеорологічних умовах. Практична цінність роботи полягає у створенні методики проектування систем зв'язку з БПЛА-ретрансляторами з урахуванням реальних експлуатаційних обмежень. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем екстреного зв'язку для потреб рятувальних служб, військових підрозділів та гуманітарних місій.

Ключові слова: тропосферний зв'язок, БПЛА, метеорологічні умови, енергетичний баланс, SDR, LimeSDR, адаптивні системи, далекий радіозв'язок.

Zhuha Y., Bilyk O. Tropospheric Communication with UAV Relay: Impact of Meteorological Conditions and SDR Validation. The paper considers the possibilities of using unmanned aerial vehicles as high-altitude relays for temporary deployment of tropospheric communication networks in emergency conditions. Modern approaches to long-range radio communication organization are analyzed and their limitations are outlined. A concept of a hybrid system at 5 GHz frequency with UAV at 200-1000 m altitude is proposed, combining the advantages of tropospheric scattering and line of sight. A methodology for assessing the impact of precipitation, fog and snow on maximum communication range based on link energy balance is developed. Simulation results are compared with experimental data obtained on an LTE training model based on the LimeSDR SDR platform. It is shown that moderate rain reduces the range by almost half, but increasing the UAV altitude partially compensates for losses. Recommendations for adaptive system operation in various meteorological conditions are proposed. The practical value of the work lies in creating a methodology for designing communication systems with UAV relays, taking into account real operational limitations. The obtained results can be used in the design of emergency communication systems for rescue services, military units and humanitarian missions.

Keywords: tropospheric communication, UAV, meteorological conditions, energy balance, SDR, LimeSDR, adaptive systems, long-range radio communication.

Постановка проблеми. Забезпечення надійного радіозв'язку на відстанях десятки кілометрів залишається актуальною проблемою для багатьох застосувань - від організації зв'язку в надзвичайних ситуаціях до створення тимчасових мереж у важкодоступних районах. Особливої гостроти це питання набуває в умовах відсутності або пошкодження стаціонарної телекомунікаційної інфраструктури, коли необхідно швидко розгорнути автономну систему зв'язку з мінімальними ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні системи далекого радіозв'язку представлені кількома основними технологіями. Супутникові системи, такі як Starlink [1], забезпечують глобальне покриття та високі швидкості передачі даних, проте мають суттєві недоліки: високу вартість обладнання та абонентської плати, значні затримки сигналу (20-40 мс для низькоорбітальних систем), залежність від зовнішньої інфраструктури та вразливість до навмисних завад. Класичні тропосферні системи дозволяють організувати зв'язок на відстанях 100-300 км за рахунок розсіювання радіохвиль у нижніх шарах атмосфери [2,3], але потребують потужних передавачів (сотні ват), громіздких антенних систем з високим коефіцієнтом підсилення (40-50 дБі) та складного обладнання для боротьби з завадами. Радіорелейні лінії забезпечують високу якість зв'язку, але обмежені умовами прямої видимості, що на рівнинній місцевості становить лише 40-50 км при стандартній висоті підвісу антен.

Аналіз існуючих рішень показує, що жодна з традиційних технологій не забезпечує оптимального поєднання мобільності, автономності, дальності та вартості для оперативного розгортання в польових умовах. У зв'язку з цим, дослідники почали розглядати альтернативні підходи з використанням висотних платформ. Концепція HAPS (High-Altitude Platform Station) передбачає розміщення телекомунікаційного обладнання на висотах 17-22 км [4], що дозволяє покривати території радіусом до 200 км. Однак такі системи вимагають спеціалізованих літальних апаратів і складні в експлуатації.

Ідея використання БПЛА як ретрансляторів для покращення характеристик систем зв'язку не є новою. В роботах [5] досліджувалися можливості створення тимчасових мереж зв'язку з використанням малих БПЛА для надання послуг у зонах стихійних лих. Автори показали, що навіть невеликі апарати, піднімаючись на висоту 100-500 м, можуть суттєво розширити зону покриття базових станцій. Проте ці дослідження фокусувалися переважно на системах малої дальності (до 10 км) і не враховували специфіку тропосферного поширення радіохвиль.

Принципово новий підхід було запропоновано в роботах Лошакова, Мартинчука та співавторів [5]. Вони розробили концепцію гібридної радіорелейно-тропосферної системи, яка поєднує переваги обох режимів поширення радіохвиль. Ключова ідея полягає у використанні БПЛА-ретранслятора на висотах 200-1000 м, що дозволяє: збільшити дальність прямої видимості відповідно до формули $d = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ км, де h_1 та h_2 - висоти антен у метрах; знизити необхідну потужність передавача до 1-10 Вт замість сотень ват у класичних системах; використовувати компактні антени з помірним коефіцієнтом підсилення; забезпечити швидке розгортання та мобільність системи.

Тропосферні системи дальнього зв'язку традиційно працюють у діапазоні 4.4-5.5 ГГц, що визначається компромісом між розмірами антен та величиною додаткових втрат. Попит на смуги 1.8-2.4 ГГц також існує, але ці діапазони часто зайняті іншими службами, що ускладнює ліцензування. Важливо враховувати, що згідно з рекомендацією ITU-R P.530 [6] ослаблення від дощу можна ігнорувати на частотах нижче 5 ГГц, тоді як на вищих частотах цей фактор стає визначальним. Модель ITU-R P.838 [7] дозволяє оцінити питомі втрати $\gamma_R = kR^\alpha$; для частоти 2.4 ГГц навіть сильні опади дають менше 0.1 дБ/км, тоді як на 5 ГГц втрати сягають 0.3-0.6 дБ/км. Отже, використання частоти 2.4 ГГц дозволяє мінімізувати вплив опадів, але вимагає врахування меншого коефіцієнта підсилення антен та можливих інтерференцій з іншими системами.

Дослідження впливу атмосферних явищ на поширення радіохвиль має довгу історію. Фундаментальні роботи Іпполіто [12] та рекомендації ITU-R [6,7,8] надають детальні моделі для розрахунку додаткового загасання в дощі, тумані та снігу. Встановлено, що на частоті 5 ГГц питоме загасання в дощі може досягати 0.6 дБ/км при інтенсивності 50 мм/год, що для траси 100 км дає неприйнятні 60 дБ додаткових втрат. Водночас, на нижчих частотах (наприклад, 2.4 ГГц) вплив опадів значно менший - лише 0.08 дБ/км для тієї ж інтенсивності дощу [9]. Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на перспективність запропонованого в [5] підходу, залишається відкритим питання кількісної оцінки впливу метеорологічних умов на ефективність системи та розробки методів компенсації погодозалежних втрат. Також недостатньо досліджено порівняльні характеристики систем на різних робочих частотах. Саме ці питання є предметом даного дослідження.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є розробка методики оцінки впливу метеорологічних умов на характеристики системи тропосферного зв'язку з БПЛА-ретранслятором, порівняльний аналіз ефективності на різних робочих частотах та експериментальна валідація запропонованих моделей на SDR-платформі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Концепція гібридної системи зв'язку. Запропонована система являє собою синтез кращих рішень класичного тропосферного та радіорелейного зв'язку з використанням сучасних SDR-технологій. Архітектура системи включає три основні компоненти: базову станцію з спрямованою антеною високого підсилення, безпілотний літальний апарат з встановленим ретранслятором та компактною всеспрямованою антеною, а також абонентські термінали з адаптивними антенними системами.

Вибір робочої частоти 5 ГГц обумовлений оптимальним балансом між розмірами антенних систем, доступною смугою частот та впливом атмосферних факторів. На цій частоті параболічна антена діаметром 1.2 м забезпечує підсилення 35 дБі при прийнятних масогабаритних

характеристиках. Для БПЛА використовується компактна всеспрямована антена з підсиленням 6 дБі, що забезпечує рівномірне покриття в усіх напрямках.

Висота польоту БПЛА в діапазоні 200-1000 м вибирається адаптивно залежно від рельєфу місцевості, необхідної дальності зв'язку та метеорологічних умов. Збільшення висоти не тільки розширює радіогоризонт, але й дозволяє частково "обійти" приземні шари атмосфери з найбільшою концентрацією опадів. При цьому енергоспоживання системи залишається в межах можливостей сучасних БПЛА середнього класу - загальна потужність споживання не перевищує 50 Вт.

Методика оцінки енергетичного балансу. Для кількісної оцінки впливу метеорологічних умов на характеристики системи розроблено методику розрахунку енергетичного балансу радіолінії. Основою методики є класичне рівняння передачі Фрііса з урахуванням додаткових факторів, специфічних для розглянутого сценарію.

Потужність сигналу на вході приймача визначається співвідношенням:

$$Pr = Pt + Gt + Gr - L_{\text{сум}} \quad (1)$$

де Pt - потужність передавача в дБм, Gt та Gr - коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен в дБі, $L_{\text{сум}}$ - сумарні втрати в радіоканалі в дБ.

Сумарні втрати включають кілька складових. Втрати у вільному просторі для відстані d (км) та частоти f (ГГц) розраховуються за формулою:

$$L_{fs} = 92.4 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (2)$$

Додаткові втрати від опадів визначаються як добуток питомого загасання α_f (дБ/км) на довжину траси. Значення α_f залежить від типу та інтенсивності опадів і розраховується відповідно до рекомендацій ITU-R P.838-3. Також враховуються атмосферне поглинання в газах (приблизно 0.01 дБ/км на частоті 5 ГГц), втрати на неточність наведення антен та в фідерних трактах (сумарно оцінюються в 6 дБ).

Для забезпечення стійкого зв'язку необхідно, щоб рівень сигналу на вході приймача перевищував його чутливість з певним запасом. Чутливість приймача визначається тепловим шумом та необхідним відношенням сигнал/шум для заданого виду модуляції та швидкості передачі даних.

Результати моделювання. Базові параметри системи, використані в розрахунках, наведені в таблиці 1. Ці значення обрані виходячи з характеристик доступного обладнання та експлуатаційних обмежень БПЛА.

Таблиця 1. Ключові параметри гібридної системи зв'язку

Параметр	Значення	Обґрунтування
Робоча частота f	5 ГГц	Компроміс між розміром антен та загасанням
Потужність передавача Pt	1 Вт (30 дБм)	Обмеження енергоспоживання БПЛА
Підсилення антени БС	35 дБі	Параболічна антена діаметром 1.2 м
Підсилення антени БПЛА	6 дБі	Всеспрямована антена
Чутливість приймача	-80 дБм	Для швидкості 10 Мбіт/с та QPSK
Цільова швидкість	10 Мбіт/с	Базова пропускна здатність
Висота польоту h	200-1000 м	Адаптивно залежно від умов

Першим етапом було визначення характеристик системи в ідеальних умовах. Розрахунок енергетичного балансу для базового сценарію (відстань 50 км, висота БПЛА 500 м, ясна погода) показав, що система має запас 4.5 дБ відносно порогу чутливості. Це підтверджує теоретичну можливість організації зв'язку на заявлених відстанях.

Для оцінки впливу опадів було проведено серію розрахунків з використанням даних ITU-R про питоме загасання для різних метеорологічних явищ. Таблиця 2 узагальнює використані значення для частоти 5 ГГц.

Таблиця 2. Питомі втрати для різних типів опадів на частоті 5 ГГц

Тип опадів	Інтенсивність	Питоме загасання, дБ/км	Характеристика
Легкий дощ	5 мм/год	0.03	Мряка, морось
Помірний дощ	15 мм/год	0.10	Звичайний дощ
Сильний дощ	30 мм/год	0.30	Зливовий дощ
Тропічна злива	50 мм/год	0.60	Сильна злива
Легкий туман	видимість 1 км	0.02	Ранковий туман
Густий туман	видимість 0.1 км	0.15	Щільний туман
Помірний сніг	5 мм/год	0.10	Звичайний снігопад

На основі цих даних було розраховано максимальну дальність зв'язку при збереженні запасу 10 дБ для надійної роботи. Результати представлені в таблиці 3.

Таблиця 3. Вплив інтенсивності дощу на максимальну дальність системи

Погодні умови	Додаткові втрати на 50 км, дБ	Максимальна дальність, км	Зменшення дальності, %
Ясна погода	0	100	0
Легкий дощ (5 мм/год)	1.5	85	15
Помірний дощ (15 мм/год)	5.0	48	52
Сильний дощ (30 мм/год)	15.0	20	80
Злива (50 мм/год)	30.0	10	90

Важливим аспектом дослідження стало порівняння впливу метеорологічних умов на різних робочих частотах. Таблиця 4 демонструє суттєву різницю в питомих втратах між частотами 2.4 ГГц та 5 ГГц.

Таблиця 4. Порівняльні питомі втрати на частотах 2.4 ГГц та 5 ГГц

Тип опадів	Інтенсивність	Питомі втрати, дБ/км (2.4 ГГц)	Питомі втрати, дБ/км (5 ГГц)
Легкий дощ	5 мм/год	0.01	0.03
Помірний дощ	15 мм/год	0.03	0.10
Сильний дощ	30 мм/год	0.05	0.30
Тропічна злива	50 мм/год	0.10	0.60

Як видно з таблиці 4, питомі втрати на частоті 2.4 ГГц суттєво нижчі за 5 ГГц: навіть тропічна злива завдає лише близько 0.10 дБ/км додаткових втрат, що у шість разів менше, ніж на частоті 5 ГГц. Це свідчить про високу стійкість зв'язку на 2.4 ГГц до погодних факторів. Водночас цей

діапазон має менший коефіцієнт підсилення антен та значно більш завантажений через Wi-Fi та інші служби, що потрібно враховувати при проектуванні систем з БПЛА.

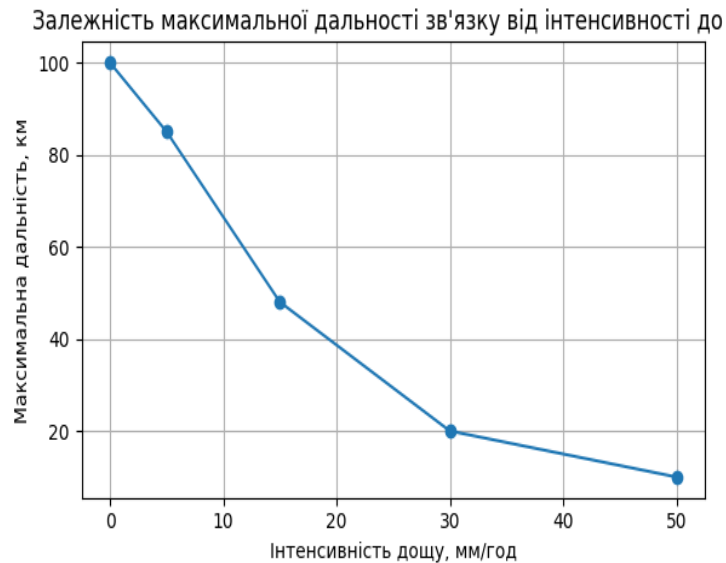


Рис. 1. Залежність максимальної дальності зв'язку від інтенсивності дощу

Як видно з наведених даних, навіть помірний дощ інтенсивністю 15 мм/год скорочує ефективну дальність зв'язку більш ніж удвічі - з 100 до 48 км. При сильному дощі система здатна забезпечити зв'язок лише на відстані до 20 км, що критично обмежує її застосування.

Одним із способів часткової компенсації втрат від опадів є збільшення висоти польоту БПЛА. Це дає подвійний ефект: скорочується довжина радіотраси за рахунок кращої геометрії, і частина траси проходить вище зони найінтенсивніших опадів. Моделювання показало, що для збереження дальності 50 км в умовах помірного дощу необхідно підняти БПЛА з базових 300 м до 600 м. При сильному дощі потрібна висота близько 1000 м, що вже наближається до практичної межі для більшості цивільних БПЛА.

Експериментальна валідація на SDR-платформі. Для перевірки адекватності розробленої моделі було проведено серію експериментів на навчальному макеті LTE мережі, побудованому на базі SDR-платформи LimeSDR. Хоча макет не повністю відтворює умови тропосферного зв'язку, він дозволяє дослідити вплив додаткових втрат на характеристики системи в контрольованих лабораторних умовах.

Експериментальна установка складалася з двох комплектів LimeSDR, що працювали як базова станція та абонентський термінал. Використовувалося програмне забезпечення srsRAN для реалізації стеку протоколів LTE. Додаткові втрати вносилися за допомогою програмованих атенуаторів, що імітували вплив опадів.

Базова конфігурація забезпечувала швидкість передачі даних 30-32 Мбіт/с при використанні 50 фізичних ресурсних блоків (PRB) та модуляції 64-QAM. При внесенні додаткових втрат 5 дБ швидкість знижувалася до 12 Мбіт/с через автоматичний перехід на більш стійку модуляцію 16-QAM. Подальше збільшення втрат до 10 дБ призводило до падіння швидкості до 3 Мбіт/с з переходом на QPSK.

Порівняння експериментальних результатів з теоретичними розрахунками показало якісну відповідність, хоча спостерігалися деякі кількісні відмінності. Реальна система виявилася більш чутливою до втрат, ніж передбачала спрощена модель. Це пояснюється додатковими факторами, такими як нелінійність трактів, недосконалість алгоритмів адаптації та накладні витрати протоколів.

Важливим результатом експериментів стало підтвердження ефективності адаптивних алгоритмів вибору модуляції та кодування. Система автоматично знижувала спектральну ефективність при погіршенні умов, зберігаючи стійкість зв'язку ціною зменшення пропускної здатності. Це критично важливо для практичного застосування в умовах змінної погоди.

Обговорення результатів та перспективи розвитку. Отримані результати демонструють складний характер взаємодії між параметрами системи та метеорологічними умовами. Аналіз даних таблиці 3 показує нелінійну залежність максимальної дальності від інтенсивності опадів. При переході від легкого до помірного дощу (з 5 до 15 мм/год) дальність скорочується непропорційно - більш ніж утричі різкіше, ніж можна було б очікувати від лінійної залежності. Це пояснюється тим, що при досягненні певного порогу втрат система змушена переходити на більш завадостійкі види модуляції з меншою спектральною ефективністю.

Порівняння з класичними тропосферними системами показує як переваги, так і обмеження запропонованого підходу. Традиційні станції тропосферного зв'язку, працюючи на нижчих частотах (зазвичай 0.3-5 ГГц) та з потужностями в сотні ват, менш чутливі до погодних умов. Однак вони потребують стаціонарного розміщення, споживають кіловати електроенергії та коштують сотні тисяч доларів. Система з БПЛА-ретранслятором, навпаки, може бути розгорнута за лічені години з мінімальними витратами, але її ефективність сильно залежить від погоди.

Цікавим є порівняння з сучасними супутниковими системами типу Starlink. Хоча супутникові термінали забезпечують стабільний зв'язок незалежно від локальної погоди (за винятком найсильніших гроз), вони мають ряд критичних недоліків для екстрених застосувань: необхідність зовнішнього живлення потужністю 50-100 Вт, час розгортання 10-15 хвилин для пошуку супутників, вразливість до електронної протидії через відомі орбітальні параметри. Система з БПЛА позбавлена цих недоліків і може працювати в режимі радіомовчання з вузькоспрямованими антенами.

Особливої уваги заслуговує економічний аспект. Вартість одного комплексу обладнання для БПЛА-ретранслятора (SDR-модуль, антени, підсилювачі) не перевищує \$2000-3000, що на порядки менше за традиційні рішення. При цьому експлуатаційні витрати обмежуються вартістю палива для БПЛА та амортизацією обладнання. Для порівняння, місячна абонплата за супутниковий зв'язок з гарантованою швидкістю 10 Мбіт/с може становити \$500-1000.

Важливим фактором є також гнучкість системи. На відміну від стаціонарних рішень, БПЛА може адаптивно змінювати свою позицію залежно від рельєфу місцевості, розташування абонентів та погодних умов. Наприклад, при наявності локальної грозової хмари БПЛА може змістити свою траєкторію польоту, щоб мінімізувати проходження сигналу через зону інтенсивних опадів. Така адаптивність принципово недосяжна для традиційних систем.

Результати експериментальної валідації на платформі LimeSDR, хоч і отримані в лабораторних умовах, дають важливу інформацію про поведінку системи при деградації каналу. Спостережуване падіння швидкості з 32 до 3 Мбіт/с при внесенні 10 дБ додаткових втрат відповідає теоретичним очікуванням для адаптивних систем. Важливо, що зв'язок зберігається навіть при значних втратах - система автоматично знижує швидкість, але не втрачає з'єднання. Це критично важливо для застосувань, де надійність важливіша за швидкість.

Додатковий аналіз енергетичної ефективності показує, що запропонована система має значні резерви для оптимізації. Використання спрямованих антен на абонентських терміналах може додати 10-15 дБ до енергетичного бюджету, що еквівалентно збільшенню дальності в 2-3 рази. Впровадження технології MIMO 2x2 дозволить не тільки подвоїти пропускну здатність, але й забезпечити додатковий вииграш 3-6 дБ за рахунок просторового рознесення. Застосування турбокодів або LDPC-кодів замість стандартних згорткових може дати ще 2-3 дБ вииграшу в енергетиці.

Окремо варто розглянути питання електромагнітної сумісності. Робота на частоті 5 ГГц має як переваги, так і недоліки. З одного боку, цей діапазон менш завантажений порівняно з 2.4 ГГц, що зменшує ймовірність взаємних завад. З іншого - необхідно враховувати можливість інтерференції з метеорологічними радарми та системами Wi-Fi 5GHz. Для мінімізації завад доцільно використовувати динамічний вибір частоти (DFS) та адаптивну потужність випромінювання.

Перспективним напрямком розвитку є інтеграція системи з існуючими мережами зв'язку. БПЛА-ретранслятор може виступати не тільки як автономна система, але і як елемент гібридної мережі, що поєднує різні технології. Наприклад, в нормальних умовах основний трафік може передаватися через наземні мережі 4G/5G, а БПЛА використовується для резервування або розширення покриття. При виході з ладу наземної інфраструктури система автоматично переходить в автономний режим.

Важливим аспектом є також питання безпеки та конфіденційності. Використання SDR-технологій дозволяє реалізувати складні криптографічні алгоритми та методи розширення спектру безпосередньо на фізичному рівні. Це робить систему стійкою не тільки до пасивного перехоплення, але й до активних завад. Можливість швидкої зміни частоти, модуляції та кодування ускладнює противнику задачу радіоелектронної боротьби.

Не можна оминати увагою і регуляторні аспекти. Використання частоти 5 ГГц для організації магістральних каналів зв'язку потребує відповідних дозволів від національних регуляторів. В умовах надзвичайних ситуацій такі дозволи зазвичай видаються в спрощеному порядку, але для постійної експлуатації необхідно пройти повну процедуру ліцензування. Альтернативою може бути використання безліцензійних ISM-діапазонів з обмеженням потужності випромінювання.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження підтвердило перспективність використання БПЛА-ретрансляторів для створення систем далекого радіозв'язку в надзвичайних ситуаціях. Запропонована гібридна концепція, що поєднує переваги тропосферного розсіювання та радіорелейного зв'язку прямої видимості, дозволяє досягти дальності до 100 км при потужності передавача всього 1 Вт. Це на два порядки менше, ніж у класичних тропосферних системах, при збереженні основних функціональних можливостей.

Ключовим результатом роботи є кількісна оцінка впливу метеорологічних умов на характеристики системи. Встановлено, що помірний дощ інтенсивністю 15 мм/год призводить до скорочення максимальної дальності з 100 до 48 км, а сильний дощ (30 мм/год) обмежує дальність 20 кілометрами. Ці обмеження є критичними і повинні враховуватися при плануванні реальних систем зв'язку. Водночас показано, що адаптивна зміна висоти польоту БПЛА з 300 до 600-1000 м дозволяє частково компенсувати погодозалежні втрати та зберегти працездатність системи в складних метеоумовах.

Порівняння з частотою 2.4 ГГц показує суттєву перевагу в стійкості до опадів: за даними таблиці 4 помірний дощ 15 мм/год викликає лише 0.03 дБ/км втрат, що дозволяє зберегти дальність зв'язку понад 80 км при аналогічних енергетичних параметрах. Це робить 2.4 ГГц привабливою альтернативою для систем з БПЛА, хоча слід враховувати більші розміри антен і більшу завантаженість спектра.

Експериментальна валідація на SDR-платформі LimeSDR підтвердила адекватність розробленої моделі енергетичного балансу. Спостережувана деградація швидкості передачі даних з 32 до 3 Мбіт/с при внесенні 10 дБ додаткових втрат відповідає теоретичним прогнозам і демонструє ефективність адаптивних алгоритмів модуляції та кодування. Важливо, що система зберігає працездатність навіть при значних втратах, автоматично знижуючи швидкість передачі даних для підтримки стійкого з'єднання.

Порівняльний аналіз з існуючими технологіями показав, що запропонована система займає унікальну нішу між класичними тропосферними станціями та сучасними супутниковими системами. Вона поєднує мобільність і низьку вартість з можливістю організації далекого зв'язку без залежності від зовнішньої інфраструктури. Вартість розгортання системи на порядки нижча за традиційні рішення, що робить її доступною для широкого кола застосувань.

Практична цінність роботи полягає у створенні методики проектування систем зв'язку з БПЛА-ретрансляторами, яка враховує реальні експлуатаційні обмеження. Розроблені рекомендації щодо вибору робочих параметрів залежно від метеоумов дозволяють оптимізувати систему для конкретних сценаріїв використання.

Подальший розвиток досліджень доцільно спрямувати в кількох напрямках. По-перше, необхідна розробка алгоритмів прогнозування та упередженої адаптації до змін метеорологічних умов з використанням даних метеослужб та бортових сенсорів БПЛА. По-друге, перспективним є дослідження гібридних схем з одночасним використанням кількох частотних діапазонів для підвищення стійкості до погодних факторів. По-третє, актуальною є оптимізація протоколів передачі даних для мобільних платформ з урахуванням специфіки аеродинамічного руху БПЛА. Нарешті, важливим напрямком є інтеграція штучного інтелекту для автоматичного управління параметрами системи в реальному часі.

Отримані результати можуть бути безпосередньо використані при проектуванні систем екстреного зв'язку для потреб рятувальних служб, військових підрозділів, гуманітарних місій та

інших застосувань, де необхідна швидка організація надійного радіозв'язку на значні відстані в умовах відсутності або пошкодження стаціонарної інфраструктури.

Список бібліографічного опису:

1. TS2 Space. Starlink and the Satellite Internet Market (2025) - Comprehensive Report. URL: <https://ts2.tech/en/starlink-and-the-satellite-internet-market-2025-comprehensive-report/> (дата звернення: 05.08.2025).
2. Everything RF. Troposcatter Communications. URL: <https://www.everythingrf.com/community/troposcatter-communications> (дата звернення: 05.08.2025).
3. Trenton Systems. What is troposcatter communication? URL: <https://www.trentonsystems.com/en-us/resource-hub/blog/what-is-troposcatter-communication> (дата звернення: 05.08.2025).
4. International Telecommunication Union (ITU). HAPS - High-altitude platform systems. URL: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> (дата звернення: 05.08.2025).
5. Лошаков В.А., Мартинчук О.О., Москалец М.В., Білик О.С., Жуга Ю.С., Севрюков О.Ю. Модернізація системи тропосферного зв'язку Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–19 квітня 2025 р. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Т. 4. – С. 34–36.. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/31183> (дата звернення: 05.08.2025).
6. ITU-R Recommendation P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. Geneva: ITU, 2018. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/en> (дата звернення: 05.08.2025).
7. ITU-R Recommendation P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Geneva: ITU, 2005. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en> (дата звернення: 05.08.2025).
8. ITU-R Recommendation P.618-13. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Geneva: ITU, 2017. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en> (дата звернення: 05.08.2025).
9. ProSoft Technology. Weather Impact on 2.4 GHz Smart Wireless Networks. URL: https://www.prosoft-technology.com/kb/how_weather_affects_24_ghz_wireless_networks (дата звернення: 05.08.2025).
10. AFAR Communications. FCC Rules for Unlicensed Wireless Equipment. URL: <https://afar.net/tutorials/fcc-rules/> (дата звернення: 05.08.2025).
11. Devopedia. Orthogonal Frequency Division Multiplexing. URL: <https://devopedia.org/orthogonal-frequency-division-multiplexing> (дата звернення: 05.08.2025).
12. Ippolito L.J. Radiowave Propagation in Satellite Communications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986rvpr.book.....I/abstract> (дата звернення: 05.08.2025).

References:

1. TS2 Space. Starlink and the Satellite Internet Market (2025) - Comprehensive Report. Available at: <https://ts2.tech/en/starlink-and-the-satellite-internet-market-2025-comprehensive-report/> (accessed 05.08.2025).
2. Everything RF. Troposcatter Communications. Available at: <https://www.everythingrf.com/community/troposcatter-communications> (accessed 05.08.2025).
3. Trenton Systems. What is troposcatter communication? Available at: <https://www.trentonsystems.com/en-us/resource-hub/blog/what-is-troposcatter-communication> (accessed 05.08.2025).
4. International Telecommunication Union (ITU). HAPS - High-altitude platform systems. Available at: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> (accessed 05.08.2025).
5. Loshakov V.A., Martynchuk O.O., Moskalyets M.V., Bilyk O.S., Zhuga Yu.S., Sevryukov O. Modernization of the tropospheric communication system. Radiotekhnika i infokommunikatsii: materials of the 29th International youth forum, 16-19 April 2025. Kharkiv: KhNURE, 2025. Vol. 4. P. 34-36. Available at: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/31183> (accessed 05.08.2025).
6. ITU-R Recommendation P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. Geneva: ITU, 2018. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/en> (accessed 05.08.2025).
7. ITU-R Recommendation P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Geneva: ITU, 2005. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en> (accessed 05.08.2025).
8. ITU-R Recommendation P.618-13. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Geneva: ITU, 2017. Available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en> (accessed 05.08.2025).
9. ProSoft Technology. Weather Impact on 2.4 GHz Smart Wireless Networks. Available at: https://www.prosoft-technology.com/kb/how_weather_affects_24_ghz_wireless_networks (accessed 05.08.2025).
10. AFAR Communications. FCC Rules for Unlicensed Wireless Equipment. Available at: <https://afar.net/tutorials/fcc-rules/> (accessed 05.08.2025).
11. Devopedia. Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Available at: <https://devopedia.org/orthogonal-frequency-division-multiplexing> (accessed 05.08.2025).
12. Ippolito L.J. Radiowave Propagation in Satellite Communications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986rvpr.book.....I/abstract> (accessed 05.08.2025).