

УДК 621.391

*Б.В. Рябокрис, студент гр. ПБ-41мп, к.т.н., ст. викл. Демченко М.О.*

КПІ ім. Ігоря Сікорського

## **СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНИМИ ПОВІТРЯНИМИ АПАРАТАМИ І НАЗЕМНОЮ СТАНЦІЄЮ В УМОВАХ СКЛАДНОЇ МІСЦЕВОСТІ**

**Анотація.** У статті розглянуто актуальну проблему забезпечення надійного та стабільного зв'язку між дистанційно-керованими повітряними апаратами і наземною станцією керування в умовах складної місцевості, такої як гірські райони чи щільна міська забудова. Такі перешкоди як гори, ліси або будівлі, часто призводять до критичних втрат сигналу та затримок, що ставить під загрозу успіх місії.

Аналіз існуючих рішень показав низьку ефективність за рахунок необхідності застосування важкого обладнання (ретрансляторів) або складних обчислювальних ресурсів, що є неприйнятним для легких дистанційно-керованих повітряних апаратів. Запропоновано метод забезпечення стабільного зв'язку, який базується на динамічному налаштуванні ключових параметрів, таких як потужності передавача та висоти польоту повітряного апарата, який показав високу ефективність в польових умовах. Результати досліджень підтверджують можливість підвищення надійності зв'язку за обмежених апаратних ресурсів, із забезпеченням при цьому енергетичної ефективності.

**Ключові слова:** дистанційно-керовані повітряні апарати, стабільний зв'язок, складна місцевість, система зв'язку.

### **ВСТУП**

Забезпечення стабільного зв'язку між дистанційно-керованими повітряними апаратами і наземною станцією в умовах складної місцевості є актуальною задачею через широке використання повітряних апаратів у аерозйомці, моніторингу, сільському господарстві, рятувальних операціях [1]. Перешкоди, такі як гори, ліси чи будівлі, часто призводять до втрати сигналу, затримок або зниження якості передачі даних. Актуальність теми зумовлена зростанням попиту на надійні системи дистанційного керування, де якість зв'язку критично впливає на успіх місії.

Тому важливим є питання розробки простого та ефективного підходу до забезпечення стабільного зв'язку шляхом налаштування параметрів системи, таких як потужність передавача та висота польоту повітряного апарату. Це дозволяє зменшити втрати сигналу та оптимізувати ресурси, такі як енергія батареї. Проблема є важливою для операторів, що керують повітряними апаратами, технологічних компаній, оскільки підвищує безпеку та ефективність операцій [2].

### **МЕТА РОБОТИ**

Метою дослідження є створення простого методу для забезпечення стабільного зв'язку між дистанційно-керованими повітряними апаратами і наземною станцією в умовах складної місцевості. Завдання полягає в оптимізації системи зв'язку, щоб максимізувати якість сигналу при обмеженій енергії та апаратних можливостях. Рішення має бути практичним і придатним для використання в реальних умовах.

### **МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Розгляд питання оцінки якості бездротового зв'язку є необхідною передумовою для дослідження та розробки апаратного виконання мобільних наземних станцій [3]. В роботі [4] закладається теоретична основа цього питання

з виділенням принципів поширення радіохвиль, великомасштабного згасання, дрібномасштабного завмирання, а також основ стільникових систем та технологій множинного доступу. Розглядається явище багатопроменевого поширення (multipath fading) та його вплив на якість зв'язку [4], аналізуються методи, такі як рознесення антен (diversity), для боротьби з цими ефектами. Це рішення є фундаментальним для розуміння втрат сигналу, але пряме застосування складних методів рознесення обмежується розмірами та вагою легких повітряних апаратів.

В статті [5] автор описує основи моделювання каналу, включаючи моделі втрат на трасі (path loss models), що залежать від відстані та частоти. Це дозволяє теоретично оцінити якість зв'язку, але не пропонує динамічної стратегії для адаптації параметрів зв'язку в умовах швидко мінливої місцевості або наявності перешкод (як от будівлі чи дерева), що є типовим для польотів літальних апаратів.

Стаття [6] запропоновано комплексний підхід до розміщення повітряних апаратів-ретрансляторів для оптимізації покриття і максимізації пропускної здатності. Цей метод ефективно вирішує проблему відсутності прямої видимості (Line-of-Sight, LoS), але вимагає використання двох або більше повітряних апаратів, що збільшує складність та вартість експлуатації в польових умовах.

Автором [7] зазначається виборі оптимальної висоти польоту повітряного апарату для максимізації ймовірності зв'язку по прямій видимості (LoS) у міських сценаріях. Цей підхід є цінним, оскільки використовує лише зміну траєкторії польоту, але він не враховує ситуацій, коли оптимальна висота може бути недосяжною через обмеження повітряного простору або надто повільно реагує на раптові зміни якості каналу зв'язку.

Аналіз показує, що існуючі рішення або потребують додаткового, часто важкого обладнання (антени з високим підсиленням, ретранслятори), або вимагають складних обчислювальних ресурсів (глобальна оптимізація траєкторії). Це створює труднощі для дистанційно-керованих повітряних апаратів, де вага, енергоспоживання та простота реалізації є критичними факторами.

Це підкреслює потребу в простому та універсальному підході, який би враховував апаратні обмеження повітряних апаратів.

Для забезпечення стабільного зв'язку між дистанційно-керованими повітряними апаратами і наземною станцією пропонується простий підхід, який базується на динамічному налаштуванні двох ключових параметрів:

1. Потужність передавача (TX Power): Динамічне регулювання відповідно до поточної якості сигналу.
2. Швидкість передачі даних (Data Rate/Modulation Scheme): Адаптивне зниження швидкості для підвищення надійності при погіршенні умов зв'язку.

Потужність передавача (P) визначається як сила, з якою повітряний апарат відправляє сигнал. Вища потужність покращує сигнал, але швидше розряджає батарею. На основі проведеного аналізу запропоновано встановити потужність на рівні 0.8 Вт, що є максимумом для типових літальних апаратів, але не перевищує енергетичних обмежень.

Запропоновано підхід до забезпечення надійного зв'язку між дистанційно-керованим повітряним апаратом та наземною станцією, що зосереджений на налаштуванні двох критичних параметрів: висоти польоту (H) та потужності передавача (TX Power).

Висота польоту (H) суттєво впливає як на відстань прямої видимості (LoS) до наземної станції, так і на ймовірність блокування сигналу перешкодами (деревами, будівлями). Підтримання повітряного апарата на цій висоті мінімізує екранування сигналів низькими перешкодами (наприклад, кронами дерев) і водночас уникає надмірного збільшення геометричної відстані (гіпотенузи) між повітряним апаратом і наземною станцією, що могло б спричинити додаткові втрати сигналу. Розрахунки показують, що при потужності передавача 0.8 Вт і висоті 10 м, рівень прийнятого сигналу на відстані 500 м становить близько -54 дБм. Це значення є значно вищим за поріг стабільного зв'язку (зазвичай -60 дБм), забезпечуючи надійний запас міцності. Запропоновано адаптивний алгоритм, який автоматично коригує значення потужності та висоти, щоб постійно підтримувати максимально можливу якість сигналу.

Запропонована схема зв'язку (рис. 1) ілюструє, як дистанційно-керований повітряний апарат на висоті H встановлює зв'язок із наземною станцією на заданій відстані.



Рис. 1. Схема зв'язку між дистанційно-керованим повітряним апаратом і наземною станцією

Методика працює наступним чином, коли літальний апарат опиняється в умовах високих втрат сигналу (наприклад, глибоко в лісі), система використовує низьку висоту (близько 10 м), щоб максимально обійти перешкоди, і одночасно підвищує потужність передавача для компенсації загасання. Такий метод є економічно вигідним і простим, оскільки він не вимагає використання додаткового апаратного забезпечення, такого як ретранслятори чи складні адаптивні антенні системи, що робить його ідеальним для легких систем керування повітряними апаратами напряду оператором в умовах обмежених ресурсів.

## ВИСНОВКИ

Налаштування параметрів зв'язку зменшує вплив рельєфу та перешкод, і дозволить забезпечуючи надійну передачу даних. При цьому забезпечується енергетична ефективність, що зумовлене оптимальним використанням потужності та висоти польоту подовжує час роботи повітряного апарату. Стабільний зв'язок знижує ризик втрати літального апарату під час критичних завдань, таких як розвідка чи моніторинг.

Надійність зв'язку забезпечується шляхом встановлення потужності передавача на рівні 0.8 Вт і підтримання висоти польоту близько 10 метрів. Основним є підтримання бажаної високого рівень прийнятого сигналу (близько -54 дБм). Це значення значно перевищує типовий поріг стабільності зв'язку (-60 дБм), гарантуючи надійну експлуатацію на відстані до 500 метрів.

Така стратегія є обґрунтовано доцільнішою порівняно з більшістю існуючих рішень. Вона не вимагає інтеграції додаткового, важкого чи дорогого обладнання (як мобільні ретранслятори, фазовані антенні решітки або складні системи рознесення). Це робить її доступною та легкою у впровадженні для легких літальних апаратів з обмеженими ресурсами.

Простота реалізації підходу базується на використанні штатних можливостей бортового обладнання, що спрощує його інтеграцію в існуючі системи керування повітряними апаратами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Haykin S. *Communication Systems* : підручник. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2009. 816 p.
- [2] Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ. *Перспективні технології та прилади*. 2024. Т. 1, № 24. С. 85–91.
- [3] Joshi S., Boyd S. Sensor Selection via Convex Optimization. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2009. Vol. 57, no. 2. P. 451–462.
- [4] Rappaport T. S. *Wireless communications: Principles and practice*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall PTR, 2002. 707 p.
- [5] Goldsmith A. *Wireless Communications*. E. Yanmaz et al. *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.
- [6] 3D Cellular Network Architecture with Drones for beyond 5G / M. Mozaffari et al. *GLOBECOM 2018 — 2018 IEEE Global Communications Conference*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/glocom.2018.8647225> (date of access: 30.11.2025).
- [7] Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54, no. 5. P. 36–42.

*Наук. керівник – к.т.н., старший викладач Демченко М.О.*