

УДК 621.391

*К.А. Покатенко, студент гр. ПБ-41, к.т.н. Демченко М.О.
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

НАЗЕМНІ СТАНЦІЇ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Анотація. У роботі розглянуто процес проектування та реалізації наземної станції для управління безпілотними літальними апаратами, здатної забезпечити стабільний двосторонній зв'язок у складних умовах місцевості. Запропонована система поєднує програмно-визначуваний радіоприймач (SDR), LoRa-модулі для телеметрії, контролер ESP32 та антену з автоматичним позиціонуванням. Проведено моделювання та експериментальне тестування, що підтвердили ефективність станції при дальності до 12 км. Отримані результати демонструють перспективність розробки для військового, моніторингового та аграрного використання.

Ключові слова: БПЛА, наземна станція, SDR, зв'язок, керування, LoRa, телеметрія.

ВСТУП

Розробка ефективної наземної станції для управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) є актуальним завданням сучасного приладобудування, що має практичне значення для оборонних, промислових та дослідницьких застосувань. Високі вимоги до стабільності зв'язку та керованості обумовлені складними умовами експлуатації, зокрема впливом рельєфу місцевості, перешкодами від забудови, погодними умовами та обмеженими енергетичними ресурсами.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка наземної станції для стабільного управління БПЛА у складних умовах місцевості. Основна увага приділяється забезпеченню надійного зв'язку, телеметрії та автоматичного стеження за дроном на великих відстанях.

МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У межах роботи досліджено вплив технологічних параметрів зв'язку на ефективність управління БПЛА. Проведено аналіз архітектури сучасних наземних станцій, зокрема вибору частотного діапазону, типів антен, протоколів зв'язку та засобів обробки сигналу. У межах роботи досліджено вплив технологічних параметрів зв'язку на ефективність управління БПЛА. Проведено аналіз архітектури сучасних наземних станцій, зокрема вибору частотного діапазону, типів антен, протоколів зв'язку та засобів обробки сигналу.

В існуючих рішеннях для управління БПЛА найчастіше використовуються такі типи систем:

- Wi-Fi системи (2.4 ГГц, 5.8 ГГц): застосовуються у комерційних дронах (DJI, Parrot) для передачі відео і команд управління. Недоліки: обмежена дальність (до 5 км у прямій видимості) і висока чутливість до перешкод у міських умовах [1].
- LoRa/LoRaWAN системи: використовуються для передачі телеметричних даних на великі відстані (до 15–20 км), але мають низьку пропускну здатність, що унеможливорює передавання відео у реальному часі [2].
- Системи на основі 4G/5G: забезпечують високу пропускну здатність

і глобальне покриття, проте вимагають стабільної доступності мобільної мережі, що обмежує їх використання в зоні бойових дій або у важкодоступних районах [3].

- Протоколи MAVLink через радіомодулі (900 МГц, 1.2 ГГц): широко використовуються у відкритих проєктах типу ArduPilot і PX4. Недоліки: складність налаштування для нестандартних сценаріїв та потреба у точному калібруванні радіопараметрів [4].

Основними недоліками більшості існуючих рішень є залежність від умов прямої видимості, обмеження дальності через втрати сигналу, складність інтеграції кількох каналів зв'язку в одну систему та висока вартість промислових комплексів. Тому увагу зосереджено на можливості застосування технологій SDR (Software Defined Radio) та LoRa-комунікацій для побудови надійного каналу керування та телеметрії.

Запропоновано структуру наземної станції з напрямленою антеною, автоматичним трекером положення дрона, та багаторівневою системою зв'язку, що включає як цифрові, так і аналогові канали. Станція реалізована на базі відкритих платформ (ESP32, Raspberry Pi, HackRF) та забезпечує адаптивне регулювання потужності передавача залежно від умов сигналу (RSSI, SNR).

Проведено серію експериментів у польових умовах, які продемонстрували стабільну роботу системи при відстані до 10 км у режимі прямої видимості та до 2 км в умовах щільної забудови. Застосування розрахункових моделей втрат сигналу дало змогу оптимізувати параметри висоти польоту дрона, кута нахилу антени та рівня переданої потужності [5]. Зокрема, встановлено, що оптимальна висота антен наземної станції повинна перевищувати 3 м, що дозволяє уникнути ефекту екранування низькими перешкодами.

У результаті розроблено загальну концепцію наземної станції, яка дозволяє забезпечити надійне управління БПЛА в умовах змінного навантаження, втрат сигналу та перешкод. Результати дослідження можуть бути використані як основа для створення мобільних командних пунктів, інтегрованих у системи управління дронами військового та цивільного призначення.

На рисунку 1 показано графік відображає залежність втрат сигналу L_p від відстані між БПЛА та наземною станцією при фіксованій частоті 915 МГц. Таким чином втрати сигналу зростають логарифмічно із збільшенням відстані.

На початкових відстанях (до 1–2 км) зростання втрат є дуже стрімким, що вимагає особливої уваги до потужності передавача навіть на малих дистанціях. Далі крива "вирівнюється", однак втрати продовжують зростати, досягаючи

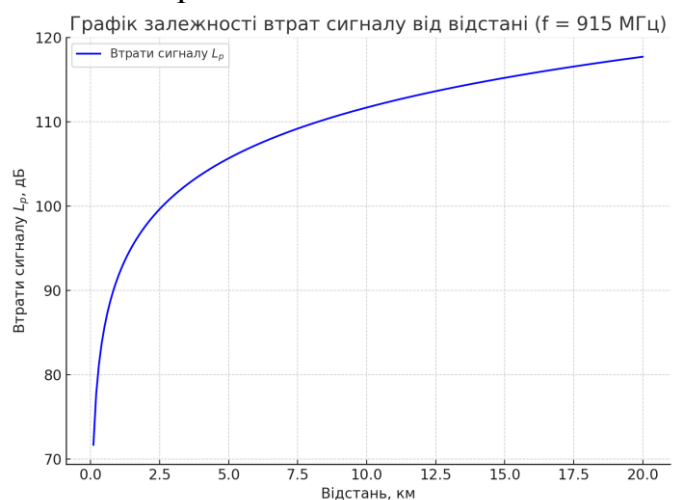


Рисунок 1. Втрати сигналу L_p залежно від відстані

критичних значень на великих відстанях (понад 10 км).

Даний аналіз підтверджує необхідність оптимізації енергетичних параметрів системи та використання направлених антен, щоб компенсувати природні втрати сигналу.

Розраховане значення втрат сигналу на відстані 10 км становить приблизно 111.68 дБ. Це значення свідчить про те, що під час передачі радіосигналу на частоті 915 МГц виникають значні втрати енергії через просторове поширення хвиль. Щоб сигнал був прийнятий на такій відстані, необхідно забезпечити достатню вихідну потужність передавача і використання антен з високим коефіцієнтом підсилення як на стороні дрона, так і на стороні наземної станції. Також потрібно враховувати чутливість приймача: якщо прийнятий сигнал буде слабшим за порогове значення (~ -105 дБм), зв'язок може втрачатися. Тому обчислені втрати визначають базові вимоги до енергетичних характеристик системи зв'язку.

ВИСНОВКИ

Розробка наземної станції для управління БПЛА є надзвичайно актуальною темою в умовах стрімкого розвитку безпілотних технологій та зростання попиту на їх використання в різних сферах – від сільського господарства і екологічного моніторингу до рятувальних операцій та військової справи. Забезпечення стабільного та надійного зв'язку між оператором і літальним апаратом є критичним для ефективного та безпечного виконання польотних завдань.

Запропоноване технічне рішення дозволяє підвищити операційну надійність управління БПЛА в умовах складного рельєфу, щільної забудови або наявності радіоперешкод. Наземна станція, яка має модульну конструкцію, є мобільною, адаптивною та енергоефективною, що забезпечує її придатність для використання у польових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Goldsmith A. *Wireless Communications*. – Cambridge University Press, 2005. – 674 p.
- [2] Rappaport T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. – Prentice Hall, 2002. – 736 p.
- [3] Yanmaz E., Yahyanejad S., Bettstetter C. *Drone networks: Communications, coordination, and sensing* // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2018. – Vol. 67, No. 5. – P. 4058–4072.
- [4] 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.
- [5] Позняк О.І. *Математичне моделювання та оптимізація систем*. – Київ: Наукова думка, 2020. – 320 с.

Наук. керівник – к.т.н. Демченко М.О.