

## УДК 621.391

*К.А. Покатенко, студент гр. ПБ-41мп, к.т.н., ст. викл. Демченко М.О.*

КПІ ім. Ігоря Сікорського

# НАЗЕМНА СТАНЦІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ПОВІТРЯНИМИ АПАРАТАМИ

**Анотація.** У роботі досліджено та реалізовано процес проєктування гібридної наземної станції, призначеної для ефективного управління дистанційно-керованими повітряними апаратами. Основний акцент зроблено на забезпеченні стабільного та надійного двостороннього зв'язку в умовах складної місцевості та на значних відстанях, де традиційні канали зв'язку можуть бути неефективними. Для досягнення цієї мети було застосовано гібридну архітектуру зв'язку, що поєднує радіочастотні канали та можливості супутникового або мобільного підключення. Описано розробку спеціалізованого програмного забезпечення для моніторингу, планування місій та інтелектуального перемикання каналів зв'язку в реальному часі для мінімізації затримок та втрати даних. Реалізація гібридної наземної станції включає розробку модульного апаратного комплексу, що підвищує її мобільність та адаптивність до різних операційних сценаріїв. Отримані результати підтверджують високу ефективність запропонованої станції, що має вирішальне значення для підвищення безпеки та успішності критичних місій дистанційно-керованих повітряних апаратів.

**Ключові слова:** повітряними апаратами, дистанційне керування, наземна станція, SDR, зв'язок, керування, LoRa, телеметрія, гібридна система, перемикання частот.

## ВСТУП

Розвиток дистанційно-керованих повітряних апаратів (ДКПА) є одним із найбільш динамічних напрямків сучасного приладобудування та авіаційної техніки. ДКПА набули критичного значення не лише у цивільних сферах, а саме для моніторингу навколишнього середовища, в сільському господарстві, для логістики, але й у спеціалізованих застосуваннях, зокрема в рятувальних операціях. Ефективність та безпека виконання польотних завдань прямо залежать від надійності та функціональності наземної станції дистанційного керування (НСДК).

## МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка та проєктування та реалізація гібридної наземної станції для стабільного управління ДКПА у складних умовах місцевості шляхом створення адаптивного комунікаційного комплексу, що забезпечує підвищену надійність, дальність зв'язку та стійкість до радіоперешкод.

## МАТЕРІАЛИ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Фундаментальні теоретичні основи, що описують поширення радіохвиль, явища завмирання, багатопроменевого розповсюдження та розрахунок пропускну здатності каналів, закладені в класичних працях А. Голдсмита [1] та Т. С. Раппапорта [2]. Специфічні питання комунікацій з БПЛА та мереж дронів розглядаються у дослідженнях Е. Янмаза та співавторів [3] та Й. Цзеня та співавторів [4]. Робота Й. Цзеня [4] чітко окреслює можливості та виклики бездротового зв'язку з БПЛА, підкреслюючи переваги високої мобільності та потенціалу прямої видимості (LoS), але одночасно показує критичні проблеми, такі як енергетичні обмеження та необхідність забезпечення надзвичайно надійного зв'язку управління (CNPС) з мінімальною затримкою. У свою чергу, Е. Янмаз [3] зосереджується на архітектурі мереж дронів, координації та сенсингу, підкреслюючи важливість підтримки стійкої зв'язності, особливо в

умовах відсутності наземної інфраструктури, що є прямим обґрунтуванням необхідності розробки надійної наземної станції.

Проведений аналіз виявив, що існуючі комерційні рішення (такі як Wi-Fi, 4G/5G, MAVLink-протоколи) є недостатньо стійкими до перешкод та не забезпечують необхідної надійності зв'язку. Тому пропонується реалізація гібридної архітектури, де ключовим елементом є протокол ExpressLRS (ELRS), який вирізняється його ультранизькою затримкою та високою надійністю. Будова системи зв'язку має наступну структуру: канал керування (ELRS) слугує основним каналом для керування та телеметрії, а канал адаптації на базі програмно-визначуваного радіо (SDR) використовується для моніторингу радіоефіру та забезпечення основи для адаптивного перемикавання частот.

Реалізована низка інженерних рішень, що підвищують оперативність та дальність НСДК: впроваджено новий поворотний механізм із компасом на  $330^\circ$ , що дозволяє точно відстежувати ДКПА. Реалізовано функціонал перемикавання каналів керування двома способами: через веб-інтерфейс та через кейсовий UART-порт, що забезпечує оперативне реагування на перешкоди. Для максимальної ефективності використовувалися антени високого підсилення: рупор 4.9–6.0 ГГц (19.5 дБі), хелікс 4.9–6.0 ГГц (14 дБі) та хелікс 1.3 ГГц, а також подвійне керування УДА-Ягі на обрану частоту. Мобільність підвищено завдяки реалізації живлення виносних антен через кейс.

Методологічні основи для створення математичних моделей і оптимізації роботи такої системи закладені у працях, присвячених прикладній математиці та оптимізації систем [5].

Для компенсації втрат сигналу проведено моделювання. На рис. 1, що відображає залежність втрат сигналу ( $L_p$ ) від відстані на частоті 915 МГц, встановлено, що втрати зростають логарифмічно:

Ключовий інженерний виклик полягав у тому, що розрахункове значення втрат на відстані 10 км становить 111.68 дБ. Це підтвердило необхідність використання високочутливого протоколу ELRS та напрямлених антен. Оптимізована висота антен НС повинна перевищувати 3 м для уникнення ефекту екранування низькими перешкодами.

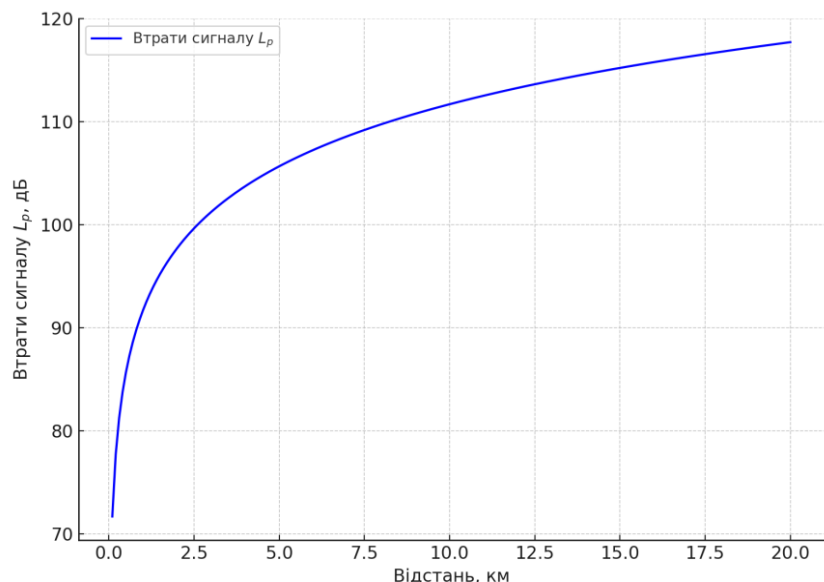


Рис. 1. Втрати сигналу  $L_p$  залежно від відстані

Таблиця 1. Характеристика мобільної станції

| <i>Категорія</i>       | <i>Показник/ Характеристика</i>           | <i>Результат / Опис</i>                                             |
|------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Ефективність зв'язку   | Максимальна дальність (гібридний режим)   | До 12 км                                                            |
|                        | Стабільна робота (пряма видимість)        | До 10 км                                                            |
|                        | Стабільна робота (умова щільної забудови) | До 2 км                                                             |
| Конструктивні Переваги | Мобільність                               | Наявність модульної конструкцію та можливість швидкого розгортання. |
|                        | Адаптивність                              | Автоматичне перемикання частоти та регулювати потужності.           |
|                        | Енергоефективність                        | Оптимізована для автономної роботи у польових умовах.               |
| Практичне Застосування | Призначення                               | Основа для створення мобільних командних пунктів.                   |
|                        | Галузі використання                       | Спеціальне та цивільне призначення.                                 |

## ВИСНОВКИ

Забезпечення стабільного та надійного зв'язку між оператором і літальним апаратом є критичним для ефективного та безпечного виконання польотних завдань. Тому саме запропоноване технічне рішення дозволяє підвищити операційну надійність управління ДКПА 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.

Тема дослідження також має високу практичну значущість, оскільки створення універсального комплексу управління дозволяє забезпечити масштабованість, спрощує впровадження безпілотних систем і знижує вартість експлуатації. Результати роботи можуть бути використані як у цивільній, так і в специфічних галузях для ефективного керування повітряними апаратами на великих відстанях.

## 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., старший викладач Демченко М.О.*