

Autodesk Fusion 360 надає зручний інструментарій для створення інноваційних рішень, що робить його незамінним інструментом у навчанні. Реалізація генеративного дизайну сприяє розвитку креативного мислення та інженерного аналізу, що є важливими компетенціями майбутніх фахівців.

ЛІТЕРАТУРА

1. Baek, S. Y., & Lee, J. (2021). Artificial intelligence-driven generative design for mechanical engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 103, 104290. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104290>
2. Gao, T., Zhang, X., & Wu, J. (2022). Generative design in additive manufacturing: Current trends and future perspectives. *Additive Manufacturing*, 55, 102847. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102847>
3. Huang, C., & Wang, Y. (2023). Enhancing product innovation through AI-based generative design techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.06.015>
4. Zhang, Y., & Li, P. (2024). Recent developments in topology optimization and generative design for sustainable engineering. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, 105965. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.105965>
5. Autodesk. (2023). *Fusion 360 User Guide*. Autodesk Inc. <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/>
6. Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43(1), 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.09.009>
7. Liu, K., & Ma, Y. (2022). Recent advances in generative design and topology optimization. *Computers in Industry*, 135, 103584. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103584>

УДК 004.92; 711

ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВТРАТИ ДАНИХ ПІД ЧАС КОМУНІКАЦІЇ МІЖ БПЛА В ГРУПАХ

А.О. Клочко¹

¹асистент кафедри інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, e-mail: a.klochko@khai.edu

Анотація. У статті розглядаються стратегії зниження ризику втрати даних під час комунікації між БПЛА (безпілотними літальними апаратами) у роевих операціях, із фокусом на міждронову та міжкластерну взаємодію. Описується використання децентралізованих та гібридних моделей комунікації для досягнення балансу між ефективністю та надійністю, з використанням протоколів DDS (Data Distribution Service) для внутрішньокластерної комунікації та LoRaWAN для міжкластерної взаємодії. DDS забезпечує обмін даними в реальному часі з низькою затримкою всередині кластерів, тоді як LoRaWAN дозволяє здійснювати довготривалу та енергоефективну комунікацію між кластерами. Запропонована ієрархічна кластерна архітектура із центральними хостами для управління

кластерними даними та одноранговою комунікацією для координації між кластерами. У дослідженні акцентовано увагу на техніках надлишковості: дублюванні повідомлень, розподіленому зберіганні даних і використанні резервних хостів для підвищення безпеки даних і стійкості до збоїв. Реалізація запропонованих підходів дозволяє підтримувати надійність роботи рою, мінімізувати збої, зменшити ризик втрати даних та забезпечити цілісність критичних даних навіть в екстремальних умовах..

Ключові слова: Рій дронів, Надлишковість даних, Ієрархічне кластерування, Внутрішньокластерна комунікація, Міжкластерна комунікація.

DECREASING RISK OF DATA LOSS DURING COMMUNICATION BETWEEN UAVS IN GROUPS

Artur Klochko¹

¹Assistant, Department of Information technologies of design, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.klochko@khai.edu

Abstract. This paper explores strategies to decrease the risk of data loss during communication among UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) in swarm operations, focusing on inter-drone and inter-cluster communication. It outlines the use of decentralized and hybrid communication models to balance efficiency and reliability, leveraging protocols such as DDS (Data Distribution Service) for intra-cluster communication and LoRaWAN for inter-cluster interaction. DDS facilitates low-latency, real-time data sharing within clusters, while LoRaWAN enables long-range, low-power communication between clusters. A hierarchical clustering architecture is proposed, with central hosts managing intra-cluster data and peer-to-peer communication handling inter-cluster coordination. The study emphasizes redundancy techniques, including message replication, distributed data storage, and backup hosts, to enhance data safety and fault tolerance. By implementing these strategies, drone swarms can maintain operational reliability, minimize disruptions, decrease risk of data loss and ensure mission-critical data integrity even in adverse conditions.

Keywords: Drone Swarm, Data Redundancy, Hierarchical Clustering, Intra-Cluster Communication, Inter-Cluster Communication.

Вступ. Комунікація між дронами означає обмін даними та командами між безпілотниками в рої для координації дій, обміну інформацією та досягнення спільних завдань. Це здійснюється за допомогою спеціальних протоколів комунікації, бездротових технологій та алгоритмів. Для задоволення інформаційних потреб можуть застосовуватися різні моделі комунікації.

Централізована модель передбачає наявність одного контролера або базової станції, яка координує роботу рою. У цьому випадку дрони взаємодіють опосередковано через контролер. Основна перевага такої моделі — простота. Однак недоліком є наявність єдиної точки відмови та висока затримка у великих роєвих системах. У децентралізованій моделі дрони спіл-

куються безпосередньо один з одним (peer-to-peer). Такий підхід забезпечує стійкість до відмов, масштабованість і швидшу комунікацію. З іншого боку, ця модель вимагає застосування складних алгоритмів для синхронізації.

Мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні стратегій зменшення ризику втрати даних під час комунікації між безпілотними літальними апаратами у складі роєвих систем шляхом впровадження ієрархічної кластерної архітектури, використання децентралізованих та гібридних моделей обміну даними із застосуванням протоколів DDS для внутрішньокластерної взаємодії та LoRaWAN для міжкластерної комунікації, а також впровадження методів надлишковості для підвищення надійності і стійкості системи.

Матеріал і результат досліджень. Для задоволення всіх вимог до даних протокол комунікації повинен підтримувати обробку різних типів даних. Одним із таких типів є позиційні дані, що включають координати GPS, висоту, швидкість та орієнтацію. Також дрони можуть обмінюватися даними сенсорів, такими як відео потоки з камер, дані лідарів або радарів, температурні показники тощо. У рої також мають передаватися команди, що стосуються змін формацій, уникнення зіткнень, виконання місій. Ще одним важливим типом даних є телеметрія, яка включає оновлення стану, рівні заряду батарей, стан систем і прогрес виконання завдань.

Існує низка протоколів комунікації, які підтримують основні сценарії взаємодії в роєвих системах. Такі протоколи мають бути з низькою затримкою, легкими за обсягом та оптимізованими для координації в реальному часі, спеціалізованими для ефективної багатовідправної (multicast) та широкомовної (broadcast) передачі даних у межах рою. Для короткотривалої комунікації рої може використовувати Wi-Fi, Bluetooth або ZigBee. Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність і підходить для передачі відео та даних у реальному часі, однак має обмежений радіус дії (~100 м у відкритому середовищі). Bluetooth також підходить для короткотривалої комунікації, особливо для дронів, що перебувають на близькій відстані один від одного.

Для довготривалої взаємодії кращим варіантом може бути LoRaWAN. Він ідеально підходить для передачі телеметрії на великі відстані. Однак, через низьку пропускну здатність цього протоколу, можуть виникати труднощі при обміні великими обсягами мультимедійних даних. Ще одним варіантом є ZigBee, який підтримує мережі сіткового типу (mesh networking) для локальної взаємодії між членами рою.

При використанні деяких із таких протоколів можуть виникати певні виклики. Затримки в комунікації можуть порушити координацію та безпеку в



реальному часі. Ефективна комунікація є критично важливою для запобігання зіткненням дронів під час складних маневрів. Також комунікація має мінімізувати енергоспоживання для збереження обмеженого заряду батарей дронів. Необхідно впроваджувати засоби безпеки, щоб запобігти несанкціонованому доступу, підміні даних або блокуванню сигналів комунікації[1]. Крім того, накладання сигналів у спільних частотних діапазонах (наприклад, Wi-Fi) може погіршувати якість зв'язку.

Для доповнення централізованого підходу в координації між дронами може бути використаний інший протокол. DDS (Data Distribution Service) — це проміжний протокол і стандарт API, розроблений для забезпечення комунікації в реальному часі, з високою масштабованістю та надійністю у розподілених системах. DDS особливо добре підходить для критично важливих застосувань, таких як автономні транспортні засоби, аерокосмічні системи, робототехніка та Інтернет речей (IoT)[2]. DDS використовує децентралізовану однорангову (peer-to-peer) модель, що усуває необхідність у центральному брокері або сервері.

Пристрої та застосунки можуть динамічно виявляти один одного та підключатися до мережі без ручної конфігурації. DDS використовує парадигму публікації/підписки на основі тем (topics), що дозволяє пристроям публікувати або підписуватися на певні типи даних.

Таким чином, DDS оптимізовано для систем реального часу, де потрібні мілі- або мікросекундні затримки. Протокол здатний обробляти тисячі вузлів і тем одночасно, що робить його придатним для великих динамічних систем, таких як рої дронів. Децентралізована архітектура гарантує, що система залишатиметься працездатною навіть у разі відмови окремих вузлів[3].

Проте, використання DDS має і певні недоліки, пов'язані зі складністю. Додається додаткове навантаження на систему через використання проміжного програмного забезпечення, що робить DDS менш придатним для пристроїв із сильно обмеженими ресурсами.

Щоб об'єднати найкращі риси обох моделей комунікації, пропонується запровадити концепцію кластерів. Кластер у контексті роєвих систем дронів, розподілених систем або комунікаційних мереж — це група взаємопов'язаних об'єктів (наприклад, дронів, пристроїв або вузлів), які працюють разом для досягнення спільної мети або виконання пов'язаних завдань[4]. Кластеризація часто використовується для організації, управління та оптимізації ресурсів у великих системах для забезпечення масштабованості, стійкості до збоїв і ефективною комунікації.

Нижче наведено структурований потік роботи для рою дронів, органі-

зованого в кластери з ієрархічною комунікацією, де для внутрішньокластерної взаємодії використовується DDS, а для міжкластерної взаємодії між центральними хостами — LoRaWAN. У кожному кластері є кілька дронів, один із яких призначений центральним хостом. Підлеглі дрони спілкуються лише із центральним хостом свого кластера. Центральні хости виступають посередниками, забезпечуючи комунікацію між своїм кластером та іншими кластерами.

Для взаємодії всередині кластера може застосовуватися DDS, оскільки він забезпечує комунікацію в реальному часі з низькою затримкою. Це дає змогу ефективно обмінюватися телеметричними даними та командами між центральним хостом і підлеглими дронами.

Для взаємодії між кластерами оптимальним вибором може бути LoRaWAN, оскільки він забезпечує комунікацію на великі відстані між центральними хостами різних кластерів. Також LoRaWAN може використовуватися для координації між кластерами та обміну агрегованими даними.

Потік комунікації може відбуватися наступним чином: він починається із внутрішньокластерної комунікації. Етап ініціалізації стартує тоді, коли всі дрони в кластері динамічно виявляють один одного за допомогою функції динамічного виявлення DDS[5]. Підлеглі дрони надсилають телеметричні дані (наприклад, позицію, рівень заряду батареї, дані сенсорів) до центрального хоста, використовуючи модель публікації/підписки на основі тем. Центральний хост агрегує отримані дані та може надсилати команди підлеглим дронам (наприклад, команди зміни формації, корекції висоти). Центральний хост публікує команди або оновлення у відповідних темах. Підлеглі дрони підписуються на ці теми для отримання інструкцій (див. Рис. 1).

Міжкластерна комунікація в основному включає взаємодію між центральними хостами. Вони використовують LoRaWAN для обміну агрегованими телеметричними даними, оновленнями статусу та командами з іншими центральними хостами. Центральні хости спілкуються між собою у децентралізованій одноранговій (peer-to-peer) манері. Вони можуть обмінюватися даними про межові позиції кластерів, передавати глобальний статус рою (наприклад, оновлення місії, сповіщення) та координувати формації між кластерами. Кожен центральний хост підтримує маршрутизувальну таблицю для прямої комунікації з іншими центральними хостами.

Агреговані дані від підлеглих дронів стискаються та передаються через LoRaWAN для зменшення використання пропускну здатності[6]. Центральні хости працюють у режимі класу С, що забезпечує майже безперервну комунікацію та доступність каналу для зворотної передачі даних у реальному часі.

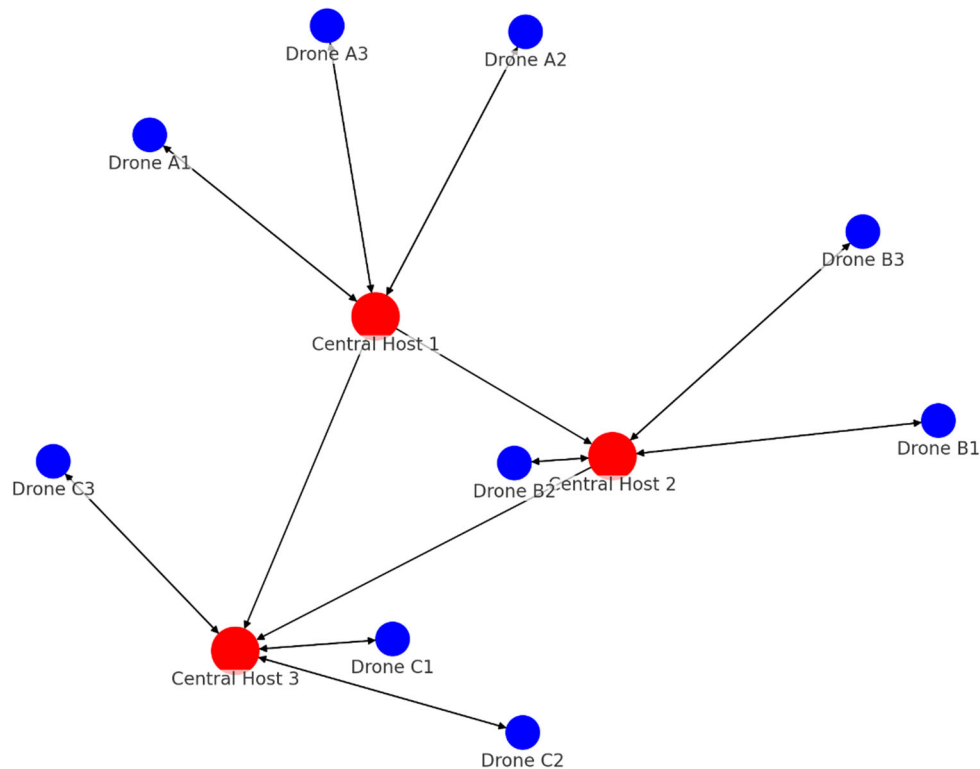


Рис. 1. – Ієрархічна кластерна архітектура з центральними хостами та кластерними дронами

Потік даних починається тоді, коли підлеглі дрони надсилають дані (через DDS) до свого центрального хоста. Центральні хости агрегують ці дані та передають важливу інформацію або команди (через LoRaWAN) іншим центральним хостам. Після цього центральні хости обробляють міжкластерні повідомлення та поширюють необхідні оновлення (через DDS) у своїх відповідних кластерах. Децентралізована комунікація зменшує кількість єдиних точок відмови, дозволяючи однорангову координацію між кластерами. DDS забезпечує ефективну комунікацію з високою пропускну здатністю всередині кластерів. LoRaWAN із його великою дальністю дії підтримує координацію між кластерами на великих територіях. LoRaWAN оптимізований для енергоефективної комунікації на великі відстані між центральними хостами, а DDS забезпечує обмін даними в реальному часі з низькою затримкою всередині кластерів [7]. У випадку відмови центрального хоста інші кластери можуть перебудуватися, щоб підтримувати загальну працездатність рою.

Можливий сценарій для демонстрації переваг такого підходу — вико-

ристання рою дронів для пошуково-рятувальних операцій. Дрони в кожному кластері сканують певні зони та передають дані з сенсорів (наприклад, теплові сигнатури) своєму центральному хосту. Центральний хост агрегує дані та видає локалізовані команди (наприклад, коригування висоти сканування). Центральні хости обмінюються оновленнями про прогрес і координатами знайдених постраждалих з іншими кластерами. Центральний хост кластера А може дати команду кластеру В допомогти в сусідній зоні.

Реалізація внутрішньокластерної взаємодії через DDS передбачає створення різних тем для різних типів даних:

- для позиційних і сенсорних даних створюється окрема тема (`telemetry/<drone_id>`),
- для прямих команд окремим дронам використовується інша тема (`command/<drone_id>`),
- також створюється окрема тема на кластер (`status/<cluster_id>`) для перевірки стану.

Реалізація міжкластерної взаємодії через LoRaWAN включає оптимізацію корисного навантаження шляхом стискування та кодування агрегованих телеметричних даних для мінімізації використання пропускну здатності. Центральні хости використовують періодичні оновлення замість безперервної передачі даних. Центральні хости налаштовуються з унікальними DevEUI для безпечної комунікації. DevEUI (Device EUI) — це глобально унікальний ідентифікатор, присвоєний пристрою в мережі LoRaWAN. Також використовується шифрування AES-128 для захисту міжкластерних повідомлень. Важливим параметром є частота передачі повідомлень — необхідно балансувати інтервали оновлення, щоб уникнути перевантаження мережі, водночас підтримуючи актуальність ситуаційної обізнаності.

Щоб забезпечити безпеку даних через надлишковість у запропонованій архітектурі рою, слід реалізувати кілька технік як на внутрішньокластерному, так і на міжкластерному рівнях. Ці підходи гарантують, що критичні дані будуть збережені та відновлені у разі збоїв зв'язку, апаратних відмов або перешкод.

Для досягнення внутрішньокластерної надлишковості (комунікація через DDS) потрібно створити резервне сховище повідомлень у кожному центральному хості, яке зберігатиме копії останніх повідомлень від підлеглих дронів. Для цього можна використовувати кільцевий буфер, що зберігає останні n повідомлень для кожного дрона. Пріоритет у збереженні повинні мати критичні дані, такі як телеметрія, команди та оновлення стану. Такий метод гарантує, що навіть якщо дрон відключиться або втратить дані, центральний хост збереже його актуальний стан.

Одночасно підлеглі дрони можуть мультикастити критичні дані до кількох сусідніх пристроїв у межах кластера. Щоб реалізувати таку поведінку, DDS має бути налаштований із QoS для надійного мультикасту. Сусідні пристрої тимчасово зберігатимуть отримані повідомлення та, за потреби, пересилатимуть їх центральному хосту. Таким чином забезпечується надлишковість у випадку, якщо центральний хост тимчасово втрачає зв'язок із дроном. Ще одним способом зменшити ризик втрати даних є дублювання даних на резервні дрони. Це передбачає призначення одного або кількох дронів у кожному кластері як резервних вузлів зберігання даних. Центральний хост дублює критичні повідомлення (наприклад, телеметрію, команди) на ці резервні дрони. Для цього може використовуватися дзеркалювання тем DDS для реплікації потоків даних. Якщо центральний хост виходить з ладу, резервні дрони можуть тимчасово перебрати його функції. Також доцільно налаштувати QoS на збереження даних у DDS (Durability QoS), щоб забезпечити збереження критичних даних навіть після відключення видавця або підписника.

Для досягнення міжкластерної надлишковості (комунікація через LoRaWAN) потрібно реалізувати реплікацію даних між центральними хостами, щоб ключові дані дублювалися у сусідні кластери. Пакети LoRaWAN повинні містити резервні телеметричні дані на рівні кластера (наприклад, позиції всіх дронів у кластері). Використання стислих або узагальнених форматів даних допоможе мінімізувати використання пропускової здатності[8]. У результаті сусідні кластери зможуть допомагати або відновлювати втрачену інформацію у разі недоступності центрального хоста. Крім того, центральні хости періодично повинні надсилати повні знімки даних кластера іншим центральним хостам через LoRaWAN. Використання функції підтвердженого висхідного каналу (confirmed uplink) забезпечить надійне отримання знімків. Такі знімки можуть бути стиснені для економії пам'яті, що дозволить історичне відновлення даних у разі втрати інкрементних оновлень.

Розподілений характер кластерів також впливає на стратегії надлишковості. Для реалізації розподіленої системи зберігання даних, де центральні хости різних кластерів поділяють відповідальність за зберігання критичних роєвих даних, можна використовувати алгоритм розподіленої хеш-таблиці (DHT) для розподілу і реплікації даних між хостами.

Оскільки центральний хост несе велику відповідальність, це збільшує ризик у разі його втрати. Підхід однорангової реплікації (peer replication), який дозволяє підлеглим дронам тимчасово зберігати критичні дані кластера, зменшує цей ризик. Щоб реалізувати цей метод, DDS має бути налаштований для розповсюдження кластерних зведень даних серед підлеглих

дронів, щоб вони зберігали їх протягом певного часу або до заповнення пам'яті. У разі відмови центрального хоста дані все одно можна буде відновити із дронів його кластера.

Надлишковість допомагає уникнути втрати даних, але також потрібно досягти належного рівня відмовостійкості[9]. Для цього в кожному кластері має бути призначений резервний центральний хост, який перебере управління у разі виходу з ладу основного. Для автоматичної активації резервного дрона може використовуватися алгоритм обрання лідера (наприклад, Paxos або Raft). Резервний дрон підписується на ті самі теми DDS, що й основний центральний хост, що забезпечує безперервну комунікацію всередині та між кластерами. Також для швидкого виявлення і усунення відмов необхідно впровадити перевірки працездатності (health checks):

- для внутрішньокластерної комунікації слід публікувати сигнали "heartbeat" всередині кластера,
- для міжкластерної взаємодії слід публікувати кластерні "heartbeat" між центральними хостами.

Для забезпечення правильного управління пропускну здатністю система повинна балансувати рівень надлишковості та доступну пропускну здатність мережі, щоб уникнути перевантаження, особливо в мережах LoRaWAN. Також слід використовувати пріоритетні політики QoS, щоб у першу чергу реплікувати критичні дані. Щодо оптимізації зберігання даних, необхідно застосовувати ефективне стиснення даних для зберігання та передачі надлишкової інформації[10]. Енергоефективність також має велике значення у випадках тривалих операцій. Тому мінімізація енергоспоживання дронами шляхом обмеження частоти передачі надлишкових даних може бути корисною. Усі надлишкові дані повинні бути надійно захищені та зашифровані (AES-128 для LoRaWAN, DDS Security для DDS)[11].

Підвищена відмовостійкість забезпечує працездатність рою навіть у разі відмови окремих дронів або центральних хостів. Покращена цілісність даних захищає від втрати чи пошкодження інформації під час комунікації. Збільшена надійність виконання місій дозволяє швидко відновлювати систему після збоїв без істотних порушень роботи. Запропонована стратегія надлишковості забезпечує надійну основу для захисту даних та відмовостійкості у розподіленій системі роєвих дронів.

Висновки. Ефективна комунікація є життєво важливою для надійної та безпечної роботи роєвих систем БПЛА, особливо у сценаріях, що вимагають скоординованих дій та обміну даними в реальному часі. У цій статті представлено архітектуру ієрархічного кластерування, яка поєднує переваги DDS та LoRaWAN для забезпечення безперервної комунікації як всередині кластерів дронів, так і між ними. DDS забезпечує обмін даними в реальному часі

з низькою затримкою всередині кластерів, що робить його ідеальним для обробки телеметрії та розповсюдження команд. LoRaWAN доповнює цю архітектуру, дозволяючи здійснювати довготривалу та енергоефективну комунікацію для координації між кластерами.

Хоча запропонована система надає значні переваги, зокрема масштабованість, надійність і безперервність виконання місій, залишаються виклики, пов'язані з керуванням пропускнуою здатністю, оптимізацією затримок і обробкою завдань із високими вимогами до пропускнуї здатності. Майбутні дослідження можуть бути зосереджені на інтеграції новітніх технологій, таких як 5G або edge computing, для подальшого підвищення можливостей роєвих систем.

Підсумовуючи, інтеграція DDS для внутрішньокластерної комунікації та LoRaWAN для міжкластерної взаємодії у поєднанні з чітко визначеною стратегією надлишковості забезпечує надійне та масштабоване рішення для комунікації в роєвих системах БПЛА. Ця архітектура відкриває шлях до більш надійної та ефективної роботи в різних сферах застосування — від пошуково-рятувальних операцій до моніторингу навколишнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gungor, Vehbi C., and Gerhard P. Hancke. "Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.10 (2009): 4258-4265.
2. Tanenbaum, Andrew S., and Van Steen, Maarten. *Distributed Systems: Principles and Paradigms*. Pearson, 2017.
3. Ahmed, Syed Ali, et al. "A survey on communication technologies for UAVs." *Ad Hoc Networks* 94 (2019): 101936.
4. Pappalardo, Giuseppe, et al. "Reliable communication for UAV swarms: Survey and challenges." *Journal of Sensor and Actuator Networks* 8.4 (2019): 57.
5. Olsson, Jonas, et al. "Communication requirements and analysis for unmanned aerial vehicle swarms." *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016
6. Chen, X., Tang, J., Lao, S. (2020). *Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols*. *Applied Sciences*, 10(10), 3661.
7. Ghazali, M. H. M., Teoh, K., Rahiman, W. (2021). *A Systematic Review of Real-Time Deployments of UAV-Based LoRa Communication Network*. *IEEE Access*, 9, 124821–124835.
8. Martinez-Caro, J. M., Cano, M. D. (2019). *IoT System Integrating Unmanned Aerial Vehicles and LoRa Technology: A Performance Evaluation Study*. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 1–12.
9. Almeida, N. C., Rolle, R., Godoy, E. P., Sisinni, E. (2021). *Swarm of Drones Using LoRa Flying Ad-Hoc Network*. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 9491655.
10. Khalil, H., Rahman, S. U., Ullah, I., et al. (2022). *A UAV-Swarm-Communication Model Using a Machine-Learning Approach for Search-and-Rescue Applications*. *Drones*, 6(12), 372.
- Khan, M. A., et al. (2020). *Performance Evaluation of UAV-Enabled LoRa Networks for Disaster*