

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ
СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО
“ _____ ” _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: «Система передавання даних для БПЛА на основі технології LoRaWAN».

Виконавець: _____ Микола ГАНЖА
(підпис)

Керівник: _____ Володимир КЛИМЧУК
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Денис БАХТІЯРОВ
(підпис)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій .
Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем .
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка» .
Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі» .

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО
“ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Ганжі Миколи Миколайовича .

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Система передавання даних для БПЛА на основі технології LoRaWAN» .
затверджена наказом ректора від 29» березня 2023 р. № 421/ст
2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: аналіз системи передавання даних для БПЛА .
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; особливості передавання даних та управління БПЛА; принципи побудови та функціонування систем передавання даних на основі технології LoRaWAN; система передавання даних лінії земля-БПЛА-земля на основі технології LoRaWAN. її апаратурна реалізація. .
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди презентації в програмному пакеті Microsoft PowerPoint. .

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	18.05.2023- 20.05.2023	Виконано
2	Вступ	20.05.2023	Виконано
3	Особливості передавання даних та управління БПЛА.	22.05.2023- 25.05.2023	Виконано
4	Принципи побудови та функціонування систем передавання даних на основі технології LoRaWAN.	26.05.2023- 01.06.2023	Виконано
5	Система передавання даних лінії земля-БПЛА-земля на основі технології LoRaWAN та її апаратурна реалізація.	02.06.2023- 11.06.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	12.06.2023- 16.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: “19” травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Володимир КЛИМЧУК
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Микола ГАНЖА
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Система передавання даних для БПЛА на основі технології LoRaWAN» містить 44 сторінки, 17 рисунків, 5 таблиць, 21 використане джерело.

КЛЮЧОВІ СЛОВА, ВИКОРИСТОВУВАНІ В ДАНІЙ РОБОТІ: БПЛА, НКУ, ТЕХНОЛОГІЯ LORAWAN, МОДУЛЯЦІЯ LORA.

Об'єкт дослідження – принципи побудови та функціонування систем передавання даних на основі технології LoRaWAN. Переваги таких систем.

Предмет дослідження – є мережа зв'язку НКУ з БПЛА на основі технології LoRaWAN.

Мета роботи полягає у розробці системи передачі даних для БПЛА на основі протоколу LoRaWAN.

Методи досліджень. У роботі використовувався математичний апарат теорії електрозв'язку, теорії ланцюгів та сигналів, нелінійних імпульсних систем.

Наведені у кваліфікаційній роботі матеріали рекомендується використовувати при проектуванні командно-телеметричного каналу зв'язку для БПЛА.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1	10
ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ТА УПРАВЛІННЯ БПЛА	10
1.1. Системи зв'язку з БПЛА	10
1.2. Особливості застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів	12
РОЗДІЛ 2	17
ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORAWAN	17
2.1. Загальний опис	17
2.1.1. <i>LoRa Alliance</i>	17
2.1.2. <i>Класифікація кінцевих пристроїв мережі</i>	19
2.2. Мережева архітектура	22
2.2.1. <i>Рівні моделі OSI для LoRaWAN</i>	23
2.2.2. <i>Модуляція</i>	23
2.2.3. <i>Ключові властивості модуляції LoRa</i>	26
2.2.4. <i>Швидкість передачі даних</i>	27
2.2.5. <i>Робочий діапазон частот</i>	27
2.2.6. <i>Вбудована безпека LoRaWAN</i>	28
2.2.7. <i>Використання LoRaWAN для геолокації</i>	29
2.2.8. <i>Застосування LoRaWAN</i>	30
2.2.9. <i>Переваги систем зв'язку на основі LoRaWAN</i>	31
РОЗДІЛ 3	33
СИСТЕМА ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ЛІНІЇ ЗЕМЛЯ-БПЛА-ЗЕМЛЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORAWAN ТА ЇЇ АПАРАТУРНА РЕАЛІЗАЦІЯ	33
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ABP – Activation by Personalization – активація за допомогою персоналізації
- ADR – Adaptive Data Rate – адаптивна швидкість передачі даних
- CSS – Chirp Spread Spectrum modulation – модуляція з розширеним спектром
- DR – Data Rate – швидкість передачі даних
- DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum – розширення спектру прямої послідовності
- FOTA – Firmware Over-the-Air – оновлення прошивки через «повітря»
- GPS – Global Positioning System – глобальна система позиціонування
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – інститут інженерів електротехніки та електроніки.
- IoT – Internet of things – інтернет речей
- ISM – “industrial, scientific, and medical” – частини радіочастотного спектру, зарезервовані на міжнародному рівні для промислових, наукових та медичних цілей
- LoRaWAN – це мережевий протокол із низьким енергоспоживанням та широкою зоною покриття, розроблений для бездротового підключення пристроїв з автономним живленням до Інтернету
- LPWA – Low Power Wide Area Network – глобальна мережа низької потужності
- LTE – Long Term Evolution — «довготерміновий розвиток», маркетингова назва
- 4G LTE – стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних
- MAC – Media Access Control – контроль доступу до медіа
- NB-IoT – Narrow Band Internet of Things – стандарт стільникового зв'язку для пристроїв телеметрії з низькими обсягами обміну даними
- OSI – The Open Systems Interconnection model – мережева модель стека мережевих протоколів OSI/ISO
- OTAA – Over-the-Air Activation – активація «по повітрю»
- RF – Radio Field – радіополе

RSSI – Received Signal Strength Indication – показник потужності отриманого сигналу

Rx – Receiver – приймач

SF – spreading Factor – коефіцієнт поширення

SNR – Signal-to-Noise ratio – співвідношення сигна/шум

TDoA – Time Difference of Arrivals – «різниця в часі прибуття» метод геолокації, що базується на принципі мультилатерації

TOA – Time on Air – час в ефірі

Tx – Transmitter – передавач

UTC – Coordinated Universal Time – світовий координатний час

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ЛА – літальний апарат

ЛЧМ – лінійна частотна модуляція

НКУ – наземний комплекс управління

САП – система автоматичного порятунку

САУ – система автоматичного управління

ТБПАК – тактичний безпілотний авіаційний комплекс

ТБПЛА – тактичний безпілотний літальний апарат

ВСТУП

Актуальність теми: На сьогоднішній день наявність розвинених систем автономного управління літальними апаратами дає можливість самотужки виконувати польотне завдання, при повній відсутності зв'язку між літальним апаратом і наземним комплексом управління. В силу великої складності і вартості подібних комплексів під час їх експлуатації потрібен постійний контроль за станом ЛА в повітрі. Також періодично виникає необхідність коригування параметрів польоту. Тому на даний час зарано говорити про можливість виключення зі складу БПЛА командно-телеметричної лінії зв'язку.

Також для літального апарату є актуальним завдання передачі даних корисного навантаження на наземну систему управління. В даному випадку часто потрібно забезпечити передачу великого обсягу даних при заданій швидкості пропускання, ймовірності бітової помилки, наявності захисту каналу зв'язку та інших параметрах. Для чого доцільно використовувати протоколи передачі даних з великою пропускнуою здатністю.

Обладнання БПЛА, яке: здійснює навігацію ЛА, забезпечує режими ручної посадки (якщо це необхідно) та система автоматичного порятунку (САП) повинні мати підвищену стійкість до відмов.

Перераховане обладнання входить в першу групу класифікації і забезпечує надійність комплексу БПЛА в цілому. Вихід з ладу будь-якого елемента обладнання першої групи призводить до негайного припинення виконання польотного завдання та поверненню ЛА на місце запуску.

Решту обладнання ЛА відносять до другої групи класифікації. При виході з ладу обладнання цієї групи рішення про подальші дії приймається оператором комплексу. Для взаємодії обладнання першої і другої груп використовують керуючі інтерфейси.

При створенні невеликих за розміром БПЛА збільшуються вимоги щодо мінімізації розмірів приймально-передавального і антенно-фідерного

обладнання. Тому завдання створення надійної радіолінії зв'язку між бортом і наземним комплексом управління є актуальним

Мета роботи полягає у розробці системи передачі даних для БПЛА на основі протоколу LoRaWAN.

Об'єкт дослідження – принципи побудови та функціонування систем передавання даних на основі технології LoRaWAN. Переваги таких систем.

Предмет дослідження – є мережа зв'язку НКУ з БПЛА на основі технології LoRaWAN.

Методи досліджень. У роботі використовувався математичний апарат теорії електрозв'язку, теорії ланцюгів та сигналів, нелінійних імпульсних систем.

Практичне значення отриманих результатів.

Наведені у кваліфікаційній роботі матеріали рекомендується використовувати при проектуванні командно-телеметричного каналу зв'язку для БПЛА.

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», 7 – 9 червня 2023 р.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ТА УПРАВЛІННЯ БПЛА

1.1. Системи зв'язку з БПЛА

Швидкі темпи розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у світі змушують постійно переглядати вимоги, що висувуються до каналу зв'язку між БПЛА і наземною системою управління.

При виборі робочого діапазону систем зв'язку невеликих за розміром БПЛА вирішальними факторами є маса та габарити бортового приймача та антенно-фідерного пристрою.

В такому випадку внаслідок обмежень за габаритами та масою приймально-передавального обладнання раціональним є утилізація єдиного каналу зв'язку для передачі командно-телеметричних даних та даних корисного навантаження. Зазвичай, при посадці таких ЛА використовується парашут, при цьому відсутня потреба у додатковому радіоканалі для передачі зображення з відеокамер ЛА, що необхідно при ручній посадці. Додатковим каналом зв'язку слугує лише лінія передачі даних САП.

Для задоволення вимог щодо пропускнуєї спроможності каналу зв'язку при одночасній передачі даних телеметрії і даних корисного навантаження, необхідно розширювати робочу смугу частот прийомо-передавального обладнання і використовувати спектрально ефективні методи модуляції, внаслідок чого збільшуються вимоги до співвідношення сигнал/шум (SNR) на вході приймача, знижується дальності дії радіосистеми, збільшується ймовірності бітової помилки і т.д.

Доцільним є вибір діапазону надвисоких частот (НВЧ), при цьому антену можна розмістити у профілі крила за рахунок її невеликих розмірів. Тому для управління такими БПЛА є раціональним використання протоколів зв'язку з

порівняно великою дальністю, наявністю шифрування даних та можливості одночасного використання декількох каналів зв'язку.

Для комплексів зі злітною масою більше 5 кг доцільним є використання діапазону ультракоротких хвиль, оскільки він забезпечує значно більшу дальність роботи, завадостійкості та меншу ймовірності бітової помилки. Також в даному випадку оптимальним варіантом є використання декількох каналів зв'язку, що працюють у різних частотних діапазонах. Наприклад команди управління та телеметрична інформація передаються в діапазоні ультракоротких хвиль, інформація зовнішніх модулів, наприклад відеокамер, в діапазоні 2.4 ГГц, а система аварійного порятунку працює у діапазоні 433 МГц (Рис 1.1.).

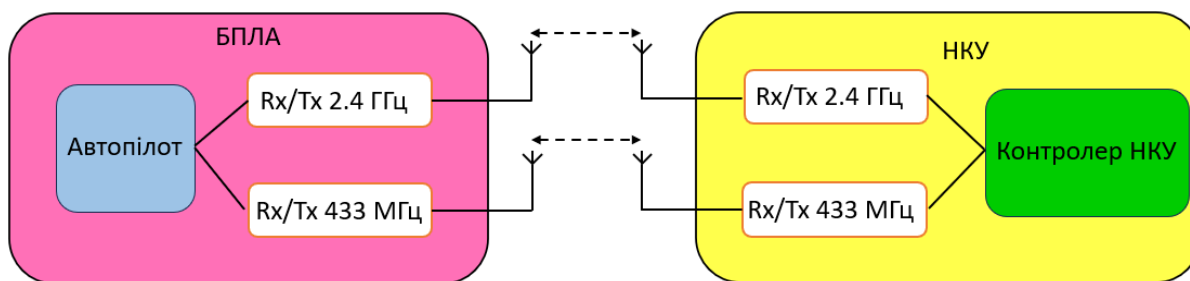


Рис. 1.1. Приклад розподілу каналів зв'язку

Під час роботи системи проводиться оцінка ймовірності бітової помилки для кожного каналу зв'язку, і приймається рішення щодо розподілу потоку командно-телеметричних даних між ними.

Використання декількох каналів зв'язку забезпечує більшу надійність системи передачі, але в той же час є неефективним з точки зору ефективного використання радіочастотного спектру. Одним зі способів підвищення ефективності системи є її адаптивна робота, що має на увазі передачу частини даних корисного навантаження через командно-телеметричний канал зв'язку, при цьому їх обсяг варіюється в залежності від поточних умов передачі радіосигналу.

Перспективним напрямом у розвитку систем зв'язку з БПЛА є використання частотних діапазонів вище 5 ГГц. При цьому стає можливою

передача великого обсягу даних корисного навантаження в режимі реального часу. Але існують фактори, які різко обмежуючими радіус дії радіосистеми зв'язку при використанні цих діапазонів, наприклад сильна залежність умов поширення електромагнітних хвиль від погодних умов, наявність прямої видимості і вплив багатопроменевості.

1.2. Особливості застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів

Розглянемо особливості застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів більш детально. Головна мета застосування тактичних БПАК – це покращення ситуаційної обізнаності командирів частин та підрозділів, штабів під час планування та ведення операцій завдяки виконанню даними комплексами функцій розвідки, спостереження та цілевказання [1-5]. Вони забезпечують ведення безпосередньої вогневої підтримки військ і впливають на формування інформаційного поля бою.

У більшості провідних країн світу до складу тактичного безпілотного авіаційного комплексу входять [11] (рис. 1.2.):

- 1) 2-4 безпілотні літальні апарати;
- 2) особовий склад підрозділів (частин) БПАК;
- 3) систему управління комплексом;
- 4) інформаційно-комунікаційна систему;
- 5) систему візуалізації інформації;
- 6) систему матеріально-технічного забезпечення життєвого циклу БПАК та інші компоненти.

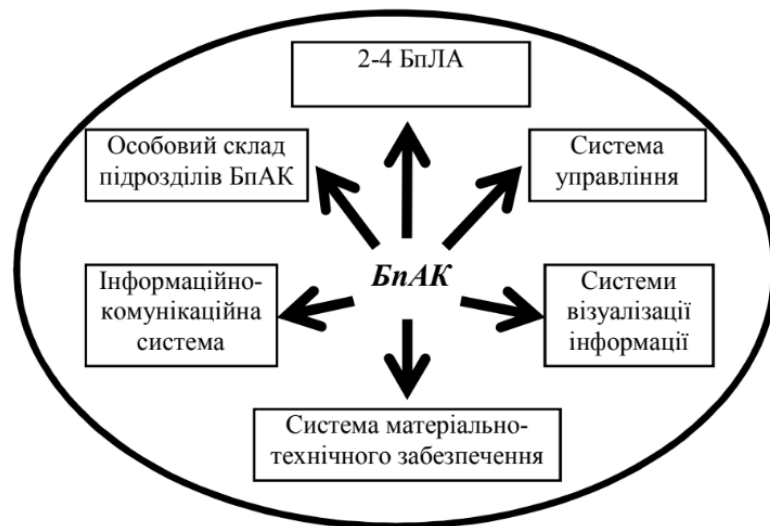


Рис. 1.2. Основні компоненти ТБПАК

З основних складових тактичного БПЛА слід виокремити (рис. 1.2.):

- власне планер (корпус) літального апарата, силову установку;
- бортове обладнання – бортовий обчислювальний комплекс, система управління польотом, система зв'язку з наземним комплексом управління та інше;
- корисне навантаження – датчики оптичного, інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання, системи скиду вантажу та інші [4, 5].



Рис. 1.2. Основні складові ТБПЛА

Основними завданнями, що покладаються на сучасні ТБПАК, є оперативне ведення повітряної розвідки та спостереження противника в інтересах командирів тактичної ланки, ідентифікація та визначення місцезнаходження основних сил противника, наземних рухомих об'єктів, систем озброєння та інших цілей, а також оцінка можливості їх ураження.

Виконання вищезазначених функцій забезпечується використанням змінного корисного навантаження модульної побудови, яке встановлюється на внутрішніх та/або зовнішніх підвісах ТБПЛА. По своїй суті безпілотний ЛА – це авіаційна платформа для транспортування корисного навантаження, яке може включати [4, 5]:

- 1) сенсори (датчики) збору розвідувальної інформації, у т.ч.:
 - фото-, теле-, тепловізійні та мультиспектральні камери;
 - лазерні далекоміри/сканери та цілевказівники;
 - системи індикації наземних рухомих цілей;
 - РЛС із синтезованою апертурою;
 - засоби радіотехнічної розвідки;
- 2) засоби ураження (смертельної та несмертельної дії)
- 3) ретранслятори зв'язку та інші вантажі.

При виборі варіантів розміщення модулів корисного навантаження враховуються їх технічні характеристики, а також умови виконання розвідувальних або інших завдань, як то погода, час доби, місцевість, протидія зі сторони противника та інші фактори.

Проаналізувавши склад та призначення бортового обладнання сучасних тактичних безпілотних авіаційних комплексів (ТБПАК) [6-10], можна дійти висновку, що їх ефективне застосування значною мірою залежить від функціональних можливостей автоматизованих систем управління польотом та корисним навантаженням ТБПЛА.

Досвід бойового застосування ТБПАК в конфліктах на Балканах, в Афганістані та Іраку [1-4] змушує звернути увагу на роль і місце систем

автоматизованого управління польотом (САУ) і корисним навантаженням при виконанні завдань, що покладаються на дані комплекси в сучасних умовах.

Незважаючи на сучасні досягнення у сфері автоматизації, комп'ютеризації та створенні робото-технічних систем застосування дронів залишається не повністю автоматичним. Польоти БПЛА управляються і у найближчому майбутньому будуть управлятися людиною.

Проте варто зазначити, що під час бойового застосування тактичних безпілотних комплексів було виявлено, що аварії БПЛА в основному виникають через помилки операторів, втрату ними уваги, перенавантаження та необхідність обробляти великі обсяги інформації[3-5]. У цьому контексті система автоматизованого управління польотом та корисним навантаженням є ключовим елементом тактичного безпілотного авіаційного комплексу, що підвищує ефективність застосування, точність навігації, автономність роботи та безпеку польотів. Крім того, вона звільняє операторів від повторюваного виконання завдань "ручного" управління[6-10].

Підсумовуючи вищенаведену інформацію зазначимо, що система автоматизованого управління польотом і корисним навантаженням ТБПЛА грає надзвичайно важливу роль у забезпеченні автономного польоту тактичного безпілотного ЛА по заданій траєкторії, на визначеній висоті та з заданою швидкістю. Вона також відповідає за виведення ЛА у визначений район та виконання завдань, відповідно до польотного плану та його змін у процесі реалізації. Однією з основних функцій системи є керування роботою корисного навантаження та передача відповідної інформації на наземний пункт управління та до її споживачів. Ця система надає можливість оператору керувати польотом БПЛА та його корисним навантаженням у ручному режимі зі стандартного пульта дистанційного управління, в автоматичному – за даними підсистем САУ та в напівавтоматичному режимі – за командами оператора.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Для управління БПЛА доцільним є використання систем зв'язку з порівняно великою дальністю, наявністю шифрування даних та можливості одночасного використання декількох каналів зв'язку.
2. На сьогоднішній день розвиток технологій автономного управління дозволяє літальним апаратам самотужки виконувати польотне завдання за допомогою автопілоту, проте це не дозволяє говорити про можливість виключення зі складу БПЛА командно-телеметричної радіолінії зв'язку.
3. Основною проблемою залишається забезпечення стійкого, безперервного, оперативного та прихованого управління бортовим обладнанням та корисним навантаженням ТБПЛА у різних умовах (погода, місцевість, радіоперешкоди, протидія противника тощо).
4. Для систем зв'язку невеликих за розміром БПЛА вирішальними факторами при виборі робочого діапазону є маса та габарити бортового приймача та антенно-фідерного пристрою. Доцільним є вибір діапазону надвисоких частот (НВЧ), при цьому антену можна розмістити у профілі крила за рахунок її невеликих розмірів.

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORAWAN

2.1. Загальний опис

LoRaWAN – це мережевий протокол із низьким енергоспоживанням та широкою зоною покриття (LPWAN), розроблений для бездротового підключення пристроїв з автономним живленням до Інтернету в регіональних, національних або глобальних мережах і відповідає ключовим вимогам Інтернету речей (IoT), таким як двоспрямований зв'язок, наскрізна безпека, послуги мобільності та локалізації[17].

Технологія була розроблена французькою компанією Cycleo of Grenoble, пізніше компанія-розробник була придбана Semtech у 2012 році. При розробці Semtech використовували модулі LoRa з мікроконтролерами Arduino і результат роботи виявився передбачувано хороший.

2.1.1. *LoRa Alliance*

Для підтримки відкритого стандарту LoRaWAN було створено LoRa Alliance – відкриту некомерційну асоціацію, що здійснює підтримку відкритого стандарту LoRaWAN і сприяє впровадженню LoRaWA для рішень IoT.

Альянс створений на початку 2015 року та є однією з найбільш швидкозростаючих груп у сфері технологій. Він налічує понад 500 членів [12] (рис. 2.1.), від великих мережевих операторів до шлюзів і виробників пристроїв, програмного забезпечення і постачальників послуг, системних інтеграторів та кінцевих користувачів, які використовують технологію.

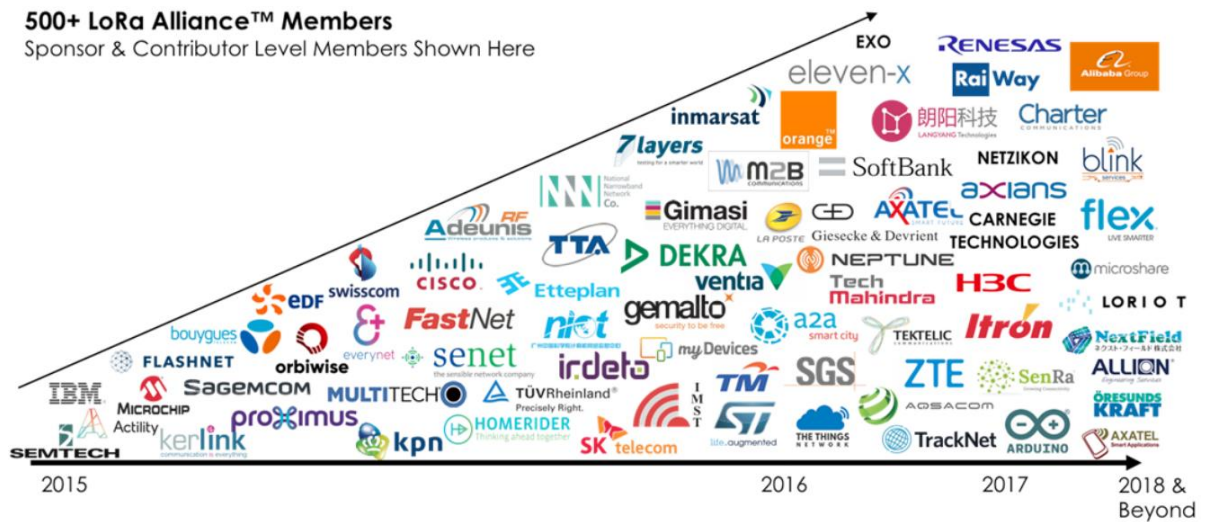


Рис. 2.1. Учасники LoRa Alliance

Завдяки стандартизації та акредитованій схемі сертифікації LoRa Alliance забезпечує сумісність, необхідну для масштабування мереж LPWA, що робить LoRaWAN провідним рішенням для глобального розгортання LPWAN. Більше половини всіх національних мереж LoRaWAN у світі працюють на платформі Actility ThingPark (рис. 2.2.), яка підтримує розгортання LoRaWAN глобальними мережевими операторами, включаючи Orange, Comcast, NTT, Softbank, Proximus, KPN, Swisscom, Enforta тощо [12].

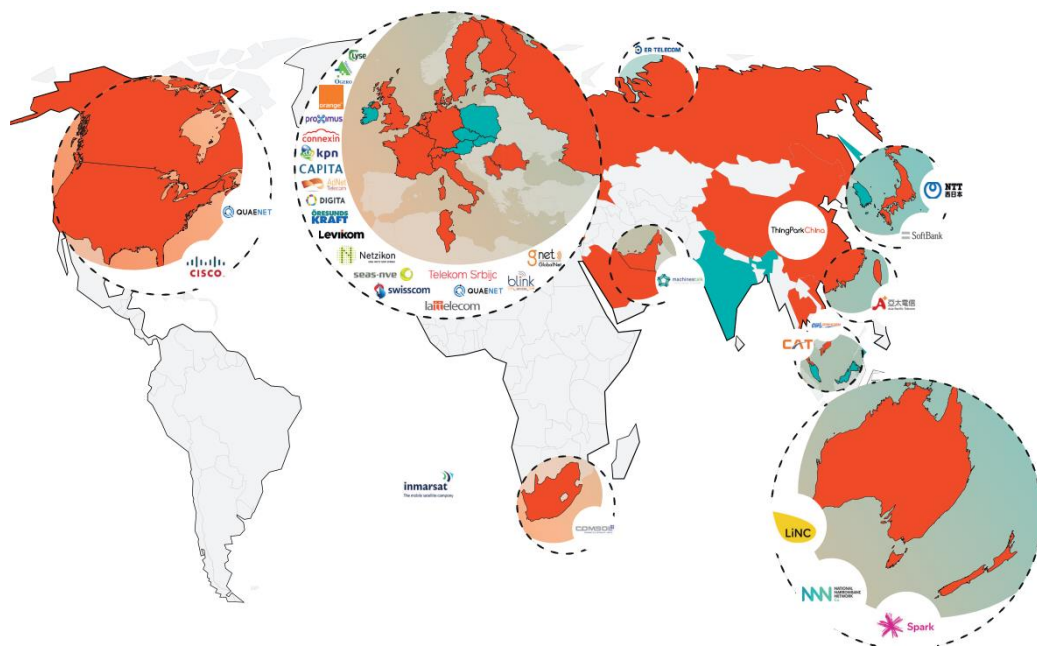


Рис. 2.2. Національні мережі LoRaWAN, що працюють на платформі Actility ThingPark

2.1.2. Класифікація кінцевих пристроїв мережі

LoRaWAN має три класи кінцевих пристроїв для задоволення різних потреб, що відображається у широкому діапазоні застосувань:

Клас А – найменша потужність, двонаправлені кінцеві пристрої:

Клас за замовчуванням, що має підтримуватися всіма кінцевими пристроями LoRaWAN, зв'язок класу А завжди ініціюється кінцевим пристроєм і є повністю асинхронним.

Після кожної передачі по висхідній лінії пристрої класу А відкривають два коротких за часом вікна на прийом; вони позначаються як RX1 та RX2 (рис. 2.3).

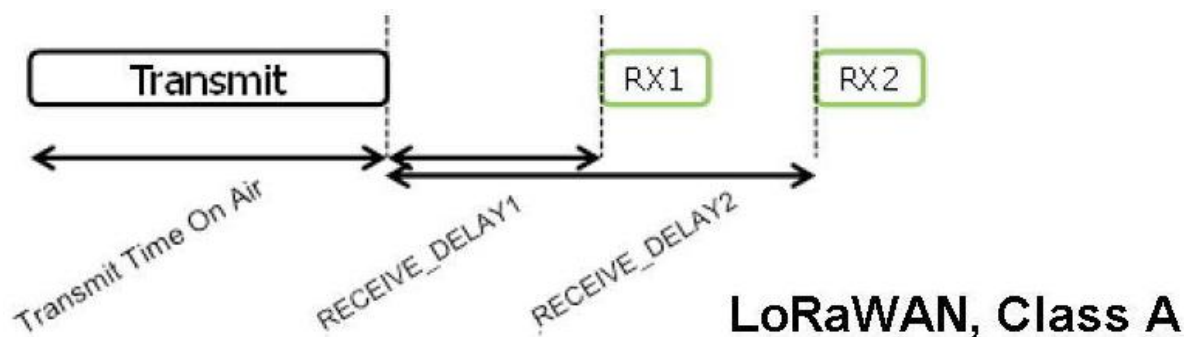


Рис. 2.3. Двонаправлений зв'язок між кінцевим пристроєм та базовою станцією для класу А. LoRaWAN

Кожна передача по висхідній лінії зв'язку може бути надіслана в будь-який час і супроводжується двома короткими вікнами низхідної лінії зв'язку, що дає можливість для двонаправленого зв'язку або команд керування мережею, якщо це необхідно. Це тип протоколу ALOHA[13].

Кінцевий пристрій може переходити в режим сну з низьким енергоспоживанням на час, визначений його власною програмою, для періодичного пробудження немає вимог до мережі. Це робить клас А режимом з найменшим споживанням енергії, при цьому дозволяє висхідний зв'язок в будь-який час.

Оскільки зв'язок по низхідній лінії завжди має слідувати за передачею по висхідній лінії зв'язку за розкладом, визначеним програмою кінцевого

пристрою, зв'язок по низхідній лінії має буферизуватися на мережевому сервері до наступної події підключення по висхідній лінії.

Клас В (Beacon) – двонаправлені кінцеві пристрої з детермінованою затримкою низхідної лінії зв'язку:

На додаток до вікон прийому, ініційованих класом А, пристрої класу В відкривають додаткові вікна для прийому за розкладом. Для синхронізації часу їх відкриття шлюзи випромінюють маячки (beacons). Маячок містить у собі ідентифікатор мережі та мітку часу (UTC). Всі шлюзи, що входять до складу одної мережі, мають випромінювати маячки одночасно.

Це надає мережі можливість надсилати зв'язок по низхідній лінії зв'язку з детермінованою затримкою, але за рахунок деякого додаткового споживання енергії кінцевим пристроєм. Затримку можна програмувати до 128 секунд відповідно до різних додатків, а додаткове енергоспоживання достатньо низьке, щоб усе ще діяти для пристроїв, що живляться від батареї.

Клас С (Continuous) – найнижча затримка, двонаправлені кінцеві пристрої:

Пристрої класу С перебувають у режимі прийому майже постійно за винятком проміжків, коли вони передають повідомлення. За винятком тимчасового вікна RX1 кінцевий пристрій використовує параметри прийому RX2 (рис. 2.4.).

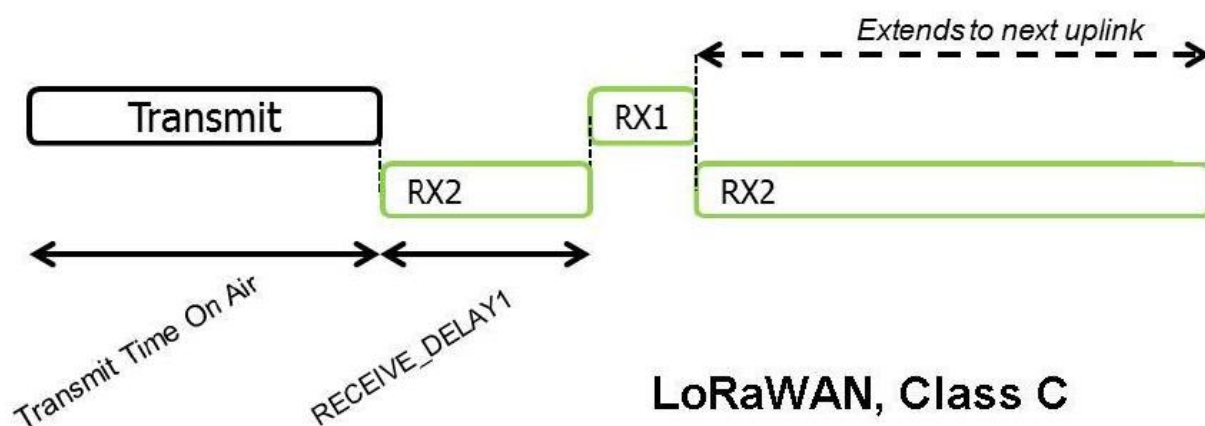


Рис. 2.4. Двонаправлений зв'язок між кінцевим пристроєм та базовою станцією для класу С LoRaWAN

Клас С може застосовуватися там, де не потрібно економити енергію (лічильники електричної енергії) або де необхідно опитувати кінцеві пристрої в довільні моменти часу.

На додаток до структури висхідної лінії зв'язку класу А, за якою слідує два вікна низхідної лінії зв'язку, клас С додатково зменшує затримку на низхідній лінії зв'язку, тримаючи приймач кінцевого пристрою відкритим увесь час, коли пристрій не передає (напівдуплекс). Виходячи з цього, мережевий сервер може ініціювати передачу по низхідній лінії зв'язку в будь-який час за умови, що приймач кінцевого пристрою відкритий, тому немає затримки. Компромісом є енергоспоживання приймача (до ~50 мВт), тому клас С підходить для застосувань, де доступне постійне живлення.

Для пристроїв із живленням від батареї можливе тимчасове перемикання режимів між класами А та С, що корисно для періодичних завдань, таких як оновлення мікропрограми по повітрю. Відношення затримки отримання повідомлень (швидкості роботи мережі) та часу автономної роботи кінцевого пристрою відповідно до його класу [12] зображено на рисунку 2.5

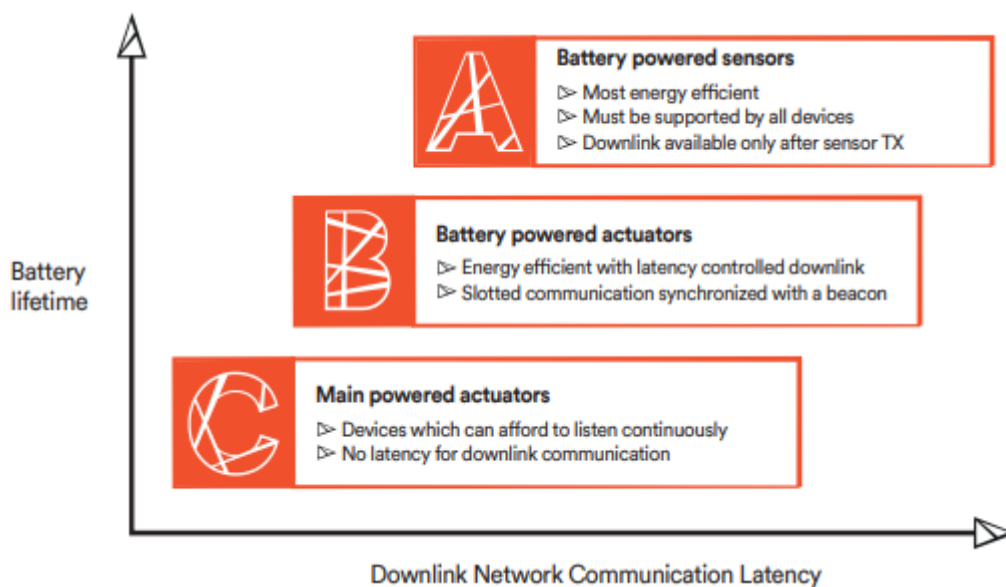


Рис. 2.5 Відношення затримки отримання повідомлень та часу автономної роботи кінцевого пристрою

2.2. Мережева архітектура

Мережна архітектура LoRaWAN розгортається за топологією «зірка», у якій шлюзи ретранслюють повідомлення між кінцевими пристроями та центральним мережевим сервером. Шлюзи підключаються до мережевого сервера через стандартні IP-з'єднання та діють як прозорий міст, перетворюючи RF-пакети в IP-пакети і навпаки.

LoRa використовує запатентовану технологію модуляції на фізичному рівні, що дозволяє здійснювати передачу даних на великі відстані з малими енерговитратами. Зазвичай максимальна відстань покриття складає від 5 до 15 км. Бездротовий зв'язок використовує переваги довгострокових характеристик фізичного рівня LoRa, що дозволяє одним «стрибком» встановлювати з'єднання між кінцевим пристроєм і одним або багатьма шлюзами. Усі режими роботи підтримують двонаправлений зв'язок, а також є підтримка груп багатоадресної адресації для ефективного використання спектру під час виконання таких завдань, як оновлення прошивки пристроїв (FOTA) або інших повідомлень масового розповсюдження. На рисунку 2.6. зображено типову структуру мережі LoRaWAN:

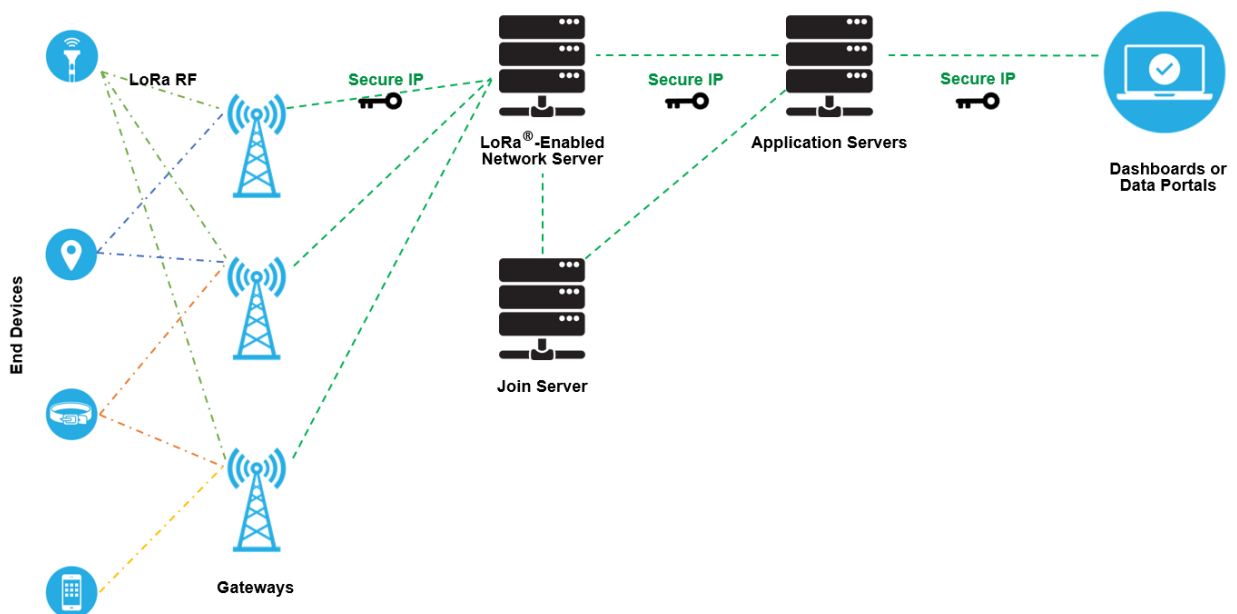


Рис. 2.6. Реалізація мережі LoRaWAN

2.2.1. Рівні моделі OSI для LoRaWAN

Мережевий протокол LoRaWAN складається з запатентованої технології модуляції на фізичному рівні LoRa (1 рівень моделі OSI), що дозволяє здійснювати передачу даних на великі відстані з малими енерговитратами та власне LoRaWAN – що представляє рівень MAC (2 рівень моделі OSI), який додано для стандартизації та розширення фізичного комунікаційного рівня LoRa в Інтернет-мережах для управління взаємодією між шлюзами LPWAN та кінцевими пристроями, як протокол маршрутизації.

Модель OSI для технології LoRa зображена на рисунку 2.7.

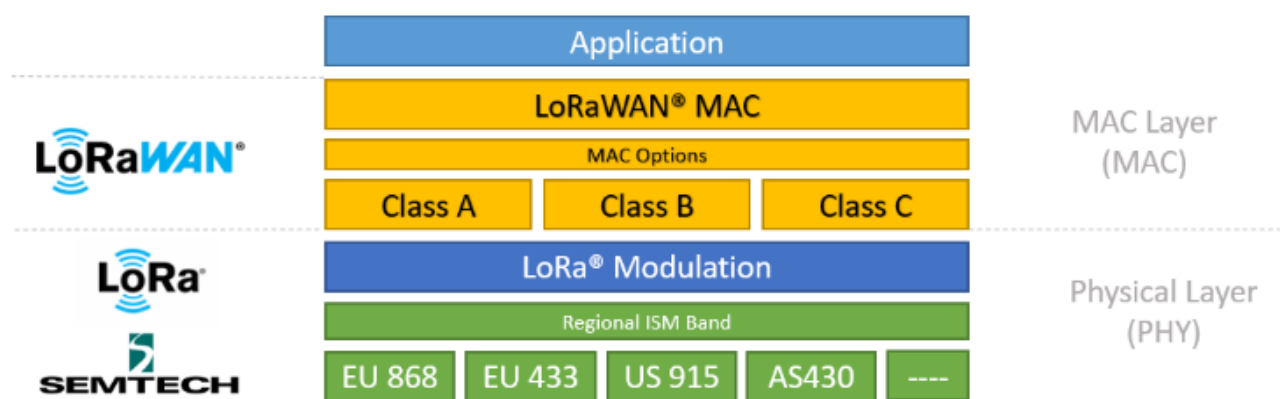


Рис. 2.7. Модель OSI для технології LoRa

2.2.2. Модуляція

LoRa базується на модуляції з розширеним спектром chirp spread spectrum modulation (CSS) та різновиді лінійної частотної модуляції, вона дозволяє знизити рівень вихідної потужності передавача, зберігаючи швидкість передачі даних та аналогічний бюджет зв'язку.

Технологія розширення спектру часто застосовується у військових та космічних комунікаціях завдяки її завадостійкості та великим відстаням зв'язку, але LoRa являє собою першу недорогу реалізацію, що розширює можливості для застосування[14].

У традиційній системі або системі з розширеним спектром прямої послідовності (DSSS) фаза несучої сигналу передавача змінюється відповідно до кодової послідовності.

При множенні сигналу даних із заздалегідь визначеним бітовим шаблоном із набагато вищою швидкістю, також відомий як код розширення (або послідовність «уламків»), створюється «швидший» сигнал, який має компоненти з вищою частотою, ніж вихідний сигнал даних. Це означає, що смуга пропускання сигналу розповсюджується за межі смуги вихідного сигналу. У радіочастотній термінології біти кодової послідовності називаються уламками (щоб відрізнити довші незакодовані біти вихідного сигналу даних). Коли переданий сигнал надходить до радіочастотного приймача, він множиться на ідентичну копію коду розповсюдження, який використовується в радіочастотному передавачі, у результаті чого створюється копія вихідного сигналу даних.

Виконання множення кодової послідовності дає вам більший бюджет радіочастотного зв'язку, тож ви можете передавати інформацію на більшій відстані. Одним із недоліків системи DSSS є те, що для неї потрібен високоточний опорний годинник. Технологія LoRa Chirp Spread Spectrum (CSS) від Semtech пропонує недорогу та малопотужну, але надійну альтернативу DSSS, яка не потребує високоточного опорного годинника. У модуляції LoRa розширення спектру сигналу досягається шляхом генерації chirp-сигналу, частота якого постійно змінюється[15], як показано на рисунку 2.8.

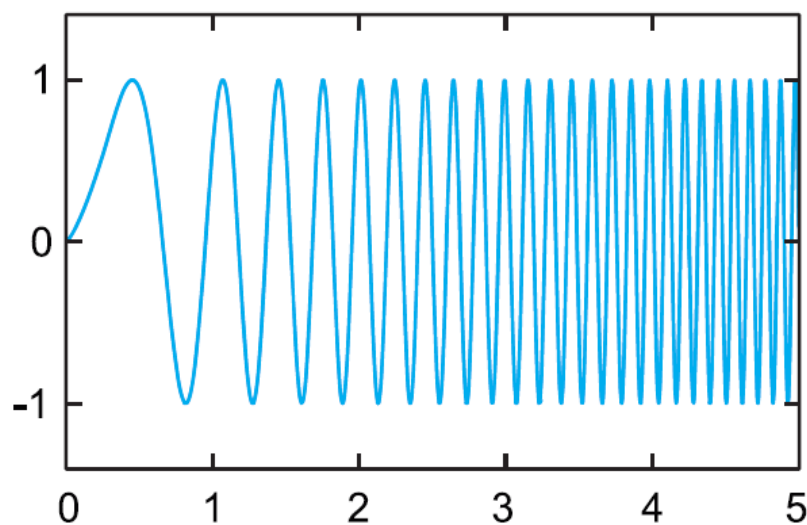


Рис. 2.8. Приклад chirp-сигналу LoRa

Перевагою цього методу є те, що часові та частотні зсуви між передавачем і приймачем еквівалентні, що значно зменшує складність конструкції приймача. Смуга пропускання частот цього чирпу еквівалентна ширині спектральної смуги сигналу. Сигнал даних (інформаційний сигнал) «чирпується» з вищою швидкістю передачі даних і модулюється на несучий CSS сигнал. На рисунку 2.9 зображено «чистий» сигнал ЛЧМ та модульований на його основі[16]:

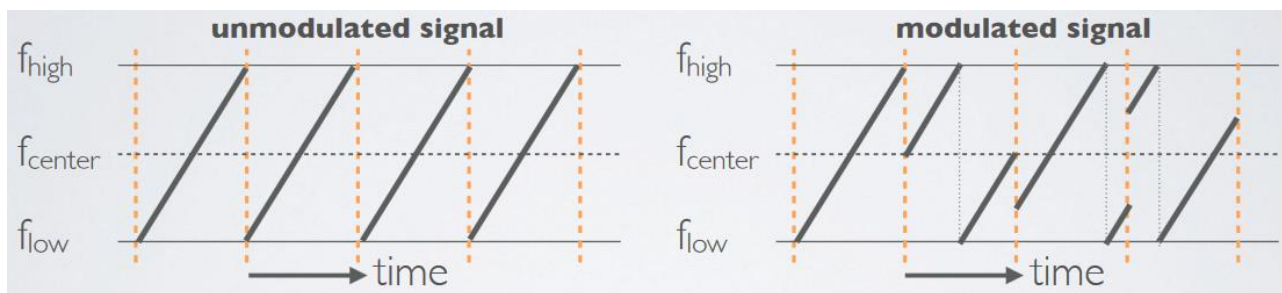


Рис. 2.9. Модульований сигнал LoRa

Модуляція LoRa також включає змінну схему корекції помилок, яка покращує надійність переданого сигналу. Після кожних чотирьох надісланих бітів інформації додатково надсилається п'ятий біт інформації про парність[14].

Крім того, LoRa використовує ортогональні коефіцієнти поширення. Це дозволяє мережі зберегти час автономної роботи підключених кінцевих вузлів шляхом адаптивної оптимізації рівнів потужності та швидкості передачі даних для окремого кінцевого вузла.

Наприклад, кінцевий пристрій, розташований поблизу шлюзу, буде передавати дані з низьким коефіцієнтом розповсюдження, оскільки потрібен дуже малий бюджет зв'язку. Однак кінцевий пристрій, розташований за кілька кілометрів від шлюзу, повинен використовувати набагато вищий коефіцієнт поширення для передачі. Вищий коефіцієнт розширення забезпечує підвищений коефіцієнт обробки та вищу чутливість прийому, хоча при цьому швидкість передачі даних буде нижчою[14].

2.2.3. Ключові властивості модуляції LoRa

Модуляція LoRa має шість коефіцієнтів поширення SF7–SF12 (SF – Spreading Factor) – котрий визначає кількість бітів, які можуть бути закодовані символом. Використання більшого коефіцієнту поширення покращує характеристики передачі для даної смуги пропускання, але збільшує необхідний час внаслідок більш низької пропускнуої спроможності каналу

У таблиці 2.1. показано чотири різні коефіцієнти розширення (SF7...SF10), які можна використовувати для повідомлень висхідної лінії зв'язку для каналу 125 кГц. Він показує еквівалентну швидкість та приблизну дальність передачі даних. Він також показує значення часу перебування або часу в ефірі (TOA – time-on-air) для 11-байтового корисного навантаження для кожного з чотирьох коефіцієнтів поширення [14].

Таблиця 2.1.

Комбінація змінних пропускнуої спроможності й коефіцієнтів розширення

Коефіцієнт поширення (вис. передача на 125 КГц)	Швидкість передачі, біт/с	Обсяг корисної інформації у пакеті, байт	Час в ефірі, мс	Дальність передачі, км (залежно від місцевості)
SF10	980	115	371	8
SF9	1760	222	185	6
SF8	3125	222	103	4
SF7	5470	222	61	2

Повідомлення низхідної лінії зв'язку, що транслюються через канали 500 кГц, можуть використовувати всі шість доступних коефіцієнтів розширення (SF7...SF12).

Важливою властивістю коефіцієнтів поширення у модуляції LoRa є ортогональність. Це означає, що сигнали, модульовані з різними коефіцієнтами поширення та передані на одному частотному каналі одночасно, не створюють перешкод один одному. Натомість сигнали з різними коефіцієнтами поширення виглядають шумом один для одного.

2.2.4. Швидкість передачі даних

Окрім стрибків частоти, усі пакети зв'язку між кінцевими пристроями та шлюзами також включають змінну «швидкість передачі даних» (DR). Вибір швидкості передачі даних дозволяє досягти динамічного компромісу між діапазоном зв'язку та тривалістю повідомлення. Крім того, завдяки технології розширеного спектру зв'язок з різною швидкістю передачі не заважає один одному та створює набір віртуальних «кодових» каналів, збільшуючи пропускну здатність шлюзу. Щоб максимізувати термін служби батареї кінцевих пристроїв і загальну ємність мережі, мережевий сервер LoRaWAN керує параметрами пропускну здатності і вихідною потужністю для кожного кінцевого пристрою окремо за допомогою схеми адаптивної швидкості передачі даних (ADR).

Швидкість передачі у мережі LoRaWAN може становити від 0,3 Кбіт/с до 50 Кбіт/с [17]. Проте існують модулі, у яких швидкість передачі даних є значно більшою (до 300 Кбіт/с).

2.2.5. Робочий діапазон частот

Для своєї роботи LoRa використовує безліцензійні субгігагерцові радіочастотні діапазони, наприклад 868 МГц у Європі та 915 МГц у Північній Америці. При використанні більш низьких частот, ніж у комунікаційних модулів на основі діапазонів ISM 2,4 або 5 ГГц, дозволяє значно збільшити зону покриття. Важливою перевагою використання LoRa в Україні є той факт, що без отримання ліцензії можна використовувати такі смуги частот: 868,0-868,6 МГц з максимальною випромінюваною потужністю до 25 мВт, та 433,04-434,79 МГц з максимальною випромінюваною потужністю до 10 мВт [18].

LoRa працює в каналі з фіксованою смугою пропускання 125 або 500 кГц – для каналів висхідної лінії зв'язку і 500 кГц – для каналів низхідної лінії.

2.2.6. Вбудована безпека LoRaWAN

У протоколі LoRaWAN використовуються два рівні забезпечення безпеки: один для мережі і один для програм. Мережевий рівень гарантує автентичність вузла в мережі, тоді як рівень безпеки програми забезпечує неможливість отримання доступу до даних додатків кінцевого користувача оператором мережі. Кожен вузол має унікальний ідентифікатор, (який гарантується IEEE) та ключі, які використовуються для перевірки його автентичності перед підключенням до мережі. Це дозволяє уникнути підробки даних та несанкціонованого доступу до мережі. У порівнянні з деякими іншими системами, де використовується єдиний ключ для аутентифікації та шифрування, система LoRaWAN розділяє ці процеси, щоб автентифікувати пакети та забезпечити цілісність даних.

Окрім цього ключі використовуються для шифрування та дешифрування даних. У якості шифрування LoRaWAN використовує симетричне шифрування AES-128 для захисту переданих даних. Це забезпечує захист від несанкціонованого доступу до інформації.

Також LoRaWAN пропонує додаткові заходи безпеки, такі як фреймворк для обміну ключами та генерації випадкових чисел, механізми захисту від атак зі зміною повідомлень та захисту від атак відмови в обслуговуванні (DoS).

У системі LoRaWAN для базового мережевого сервера існують два способи аутентифікації та 38 активацій, описаних у специфікації LoRaWAN: активація за допомогою персоналізації (ABP) та активація "по повітрю" (OTAA). Активація "по повітрю" (OTAA) спрощує процес активації кінцевих пристроїв у будь-якій мережі, оскільки вони не потребують персоналізації з використанням адреси пристрою (DevAddr) та мережевого ключа. Замість цього, при кожному приєднанні кінцевого пристрою до мережі, він отримує унікальний ключ сеансу для шифрування та перевірки передач на мережевому рівні. Використання окремого ключа сеансу мережі та ключа сеансу додатка дозволяє використовувати об'єднані мережеві сервери, де дані програм не можуть бути прочитані або підроблені мережевим провайдером[14].

Ці заходи безпеки допомагають забезпечити конфіденційність, цілісність та доступність даних, переданих за допомогою протоколу LoRaWAN, зменшують ризик несанкціонованого доступу та покращують загальну безпеку мережі.

2.2.7. Використання LoRaWAN для геолокації

LoRaWAN розширює можливості використання економічно вигідних рішень геолокації, завдяки чому наскрізна цифрова логістика стає реальністю. Завдяки геолокації можна визначати місцезнаходження зв'язаних об'єктів, відстежувати їх рух або створювати геозони, щоб отримувати сповіщення про переміщення об'єктів за межі визначеної області. Багато програм можуть отримати вигоду від використання геолокації – на основі GPS або LoRaWAN, в залежності від вимог.

Мережі LoRaWAN можуть визначати місцезнаходження пристроїв без використання GPS, просто використовуючи радіосигнали. Три базові станції, які синхронізовані за часом (за допомогою GPS), можуть визначати положення будь-якого датчика за допомогою трилатерації. Вимірювання різниці часу прибуття (TDoA) перетворюється на відстань між пристроєм і трьома фіксованими точками (шлюзами), що дозволяє встановити приблизне місцезнаходження. За рахунок відсутності модуля GPS на пристрої зменшується його вартість та енергоспоживання.

Хоча геолокація на основі GPS не є новою, LoRaWAN зробив її набагато більш економічною та універсальною. Двоспрямоване підключення LoRaWAN з вбудованим чіпом GPS забезпечує надзвичайно довгий термін служби батареї (до 10 разів більше, ніж при використанні мереж стільникового зв'язку), що дозволяє датчикам працювати протягом кількох тижнів або місяців без підзарядки. Використання LoRaWAN як комунікаційної технології дозволяє зменшити енергетичні витрати більш ніж на порядок.

2.2.8. Застосування LoRaWAN

Технологія LoRaWAN була розроблена для використання в сценаріях, де датчик передає невеликі обсяги даних кілька разів на день. Вона добре підходить для інтелектуальних лічильників, трекерів, датчиків навколишнього середовища та інших подібних пристроїв. Вона не призначена для ситуацій, де вимагається висока швидкість передачі даних, наприклад, передача аудіо або відео. Однак LoRaWAN можна використовувати для керування іншими функціями бездротових пристроїв. Наприклад, відправити команду камері розпочати передачу даних і залишатися в режимі низького енергоспоживання, якщо передавати відео не потрібно.

Мережі LoRaWAN забезпечують широку різноманітність вертикальних рішень, що дозволяє постачальникам послуг використовувати одну платформу та стандарт для керування різними варіантами використання, такими як:

- Енергетика та комунальні послуги: автоматичне зчитування показань лічильників води, газу та електроенергії;
- «Розумні міста»: розумні програми для паркування, освітлення та утилізація відходів;
- Smart Industries: моніторинг обладнання на заводах, застосування безпеки на залізниці, моніторинг внутрішнього середовища в аеропортах, моніторинг рівня рідини та потоку для нафти та газу тощо;
- Управління будівлями та спорудами: енергоефективність та виявлення витоків води;
- Логістика та ланцюги постачання: глобальне відстеження активів та моніторинг товарів;
- Точне сільське господарство: розумне зрошення, управління врожаєм та моніторинг великої рогатої худоби;
- Споживчий IoT: витратні матеріали, моніторинг будинку і відстеження споживачів.

2.2.9. Переваги систем зв'язку на основі LoRaWAN

У мережах LoRaWAN обладнання працює в асинхронному режимі. Кінцеві пристрої активно передають дані лише тоді, коли у них є що передавати, в інші моменти вони перебувають у режимі «сну», що дозволяє економити заряд батареї.

Для розгортання мереж LoRaWAN не потрібно ліцензування. Кінцевим пристроям не потрібні SIM-карти.

Пристрої LoRa можуть підтримувати двосторонній зв'язок (напівдуплекс), це означає, що вони можуть як передавати дані, так і отримувати їх.

Мережа LoRaWAN забезпечує високий рівень безпеки, використовуючи два рівні захисту. Один рівень забезпечує безпеку мережі, а інший — безпеку додатків. Крім того, сигнали малої потужності, що використовуються в лінійно-частотній модуляції, важко виявити та перехопити.

Місцезнаходження кінцевих пристроїв в мережі LoRaWAN можна визначити, навіть якщо вони не мають модуля супутникової навігації. Для цього потрібна наявність поряд принаймні трьох шлюзів. Розташування пристрою обчислюється на основі різниці в часі між відправкою та отриманням повідомлення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. LoRaWAN – це мережевий протокол із низьким енергоспоживанням та широкою зоною покриття, розроблений для бездротового підключення пристроїв з автономним живленням до мережі Інтернет.
2. Мережна архітектура LoRaWAN розгортається за топологією «зірка», у якій шлюзи ретранслюють повідомлення між кінцевими пристроями та центральним мережевим сервером. Шлюзи підключаються до мережевого сервера через стандартні IP-з'єднання та діють як прозорий міст, перетворюючи RF-пакети в IP-пакети і навпаки.

3. Мережевий протокол LoRaWAN складається з запатентованої технології модуляції на фізичному рівні LoRa (1 рівень моделі OSI) та власне LoRaWAN – що представляє рівень MAC (2 рівень моделі OSI), який додано для стандартизації та розширення фізичного комунікаційного рівня LoRa як протокол маршрутизації.
4. LoRa базується на модуляції з розширеним спектром chirp spread spectrum modulation (CSS) та різновиді лінійної частотної модуляції, вона дозволяє знизити рівень вихідної потужності передавача, зберігаючи швидкість передачі даних та аналогічний бюджет зв'язку.

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМА ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ЛІНІЇ ЗЕМЛЯ-БПЛА-ЗЕМЛЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORAWAN ТА ЇЇ АПАРАТУРНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Для БПЛА цивільного та військового призначення потрібно організувати стабільний систему передачі даних, що буде забезпечувати багатоканальний зв'язок з сервером (НКУ) для двобічної передачі даних на великі відстані з мінімальною затримкою. Основними функціями такої системи є передача команд управління ЛА, телеметричних даних з нього, команд управління додатковим бортовим обладнанням та передача відеосигналу з дрона. Структурна схема зв'язку БПЛА з НКУ зображена на рисунку 3.1.:

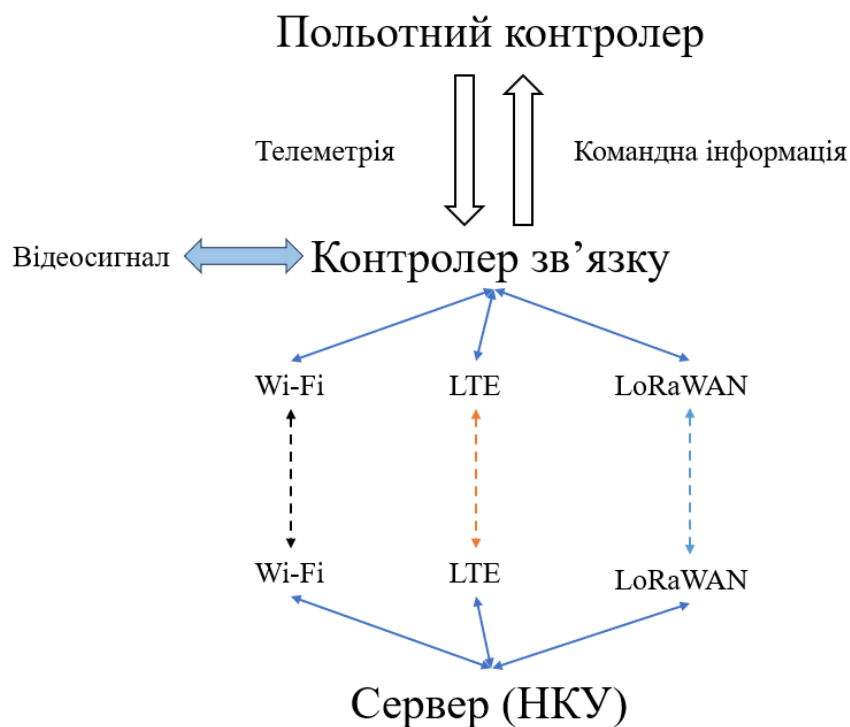


Рис. 3.1. Структурна схема системи зв'язку БПЛА

Окрім контролеру зв'язку схема включає в себе ще одну важливу частину – польотний контролер. Він керує роботою усіх систем: двигунів, системи живлення, ультразвукових далекомірів та датчиків візуального позиціонування, отримує інформацію про своє місцезнаходження від модуля системи

глобального позиціонування та інерційної системи навігації (акселерометр, гіроскоп, магнітометр), оброблює сигнал з модуля радіозв'язку та інше.

Тому розроблена система зв'язку для БПЛА має включати декілька каналів зв'язку для розділення потоку даних. Попередньо зазначимо, що для передачі потоку відеоданих у режимі реального часу доцільно використовувати системи на основі протоколів зв'язку з високою пропускнуною спроможністю, наприклад Wi-Fi або LTE. Для передачі командно-телеметричної інформації пропонується використати протокол LoRaWAN, оскільки він забезпечує:

- Дальність роботи (>10 км)
- Швидкість передачі даних (>50 Кбіт/с)
- Наявність вбудованого шифрування
- Невеликі масу та габарити бортового приймача та антенно-фідерного пристрою
- Помірне споживання енергії

У якості шлюзу для НКУ мною обрано рішення від Cisco IXM-LPWA-800-16-K9 (рисунок 3.2.), оскільки він працює у діапазоні ISM 870 МГц[19]. Бездротовий шлюз Cisco підтримує пристрої класу А, В та С, адаптивну швидкість передачі даних (ADR), рознесення каналів, інтегровану синхронізацію часу GPS і геолокацію з апаратною підтримкою трилатерації на основі TDOA та RSSI.



Рис. 3.2. Шлюз Cisco IXM-LPWA-800-16-K9

Цей продукт має захист за стандартом IP67 і може бути встановлений на відкритому повітрі. Його також можна встановити в закритих приміщеннях, таких як гараж, підвал або стеля всередині будівлі. Він оснащений підтримкою двох методів живлення (802.3at POE+ та 48 VDC), двома роз'ємами радіочастотної антени, антеною GPS, портом USB і консольним портом, як показано на рисунку 3.3.:

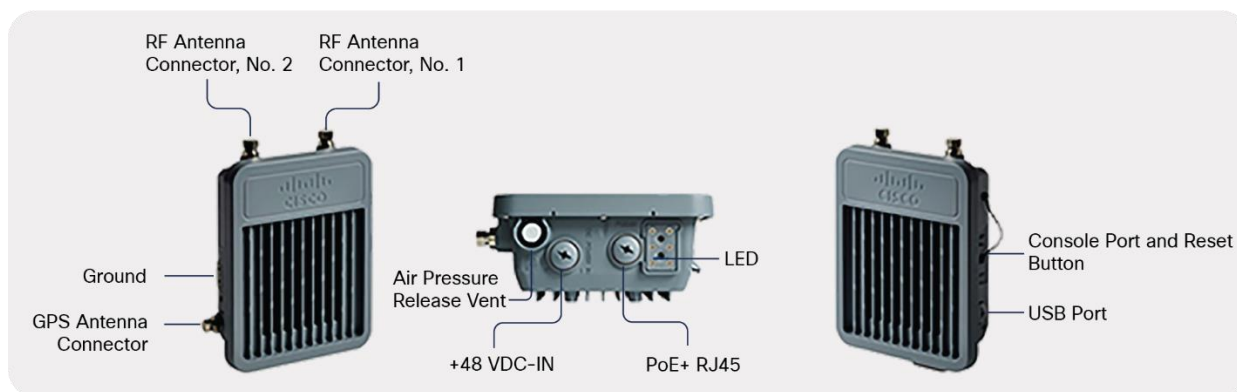


Рис. 3.3. Зовнішні інтерфейси підключення

Шлюз підтримує до 16 каналів висхідної лінії зв'язку, за рахунок чого він може отримувати до 16 пакетів даних одночасно. Подібне виконання покращує використання радіочастотного спектру до 4 МГц у смузі пропускання каналів і тим самим збільшує загальну пропускну здатність системи.

Цей продукт підтримує рознесення частотних каналів, що допомагає в поширенні бездротового сигналу від кінцевих точок до шлюзу, особливо в середовищах з багатопроменевим поширенням і для програм геолокації.

Також він дозволяє створювати як всеспрямовані, так і секторні шаблони розповсюдження. Всеспрямовані стільники просто встановлюються за допомогою всеспрямованої антени з одним шлюзом, тоді як трисекторні стільники можуть складатися з трьох шлюзів із 120-градусною секторною антеною на кожен блок. Секторизація корисна для розгортання з високою щільністю, оскільки вона ефективно збільшує ємність комірки.

Шлюз має чутливість приймача до -139,5 dBm, Для діапазону ISM 868 МГц у Європі підтримує ефективну потужність випромінювання (ERP) до +27 dBm на

каналі високої потужності на частоті 869,525 МГц і +14 дБм на інших каналах, відповідно до EN 300 220-2

У якості антени для шлюзу пропонується використовувати всеспрямовану ANT-LPWA-DB-O-N-5. Нижче наведені її характеристики:

- Діапазон робочих частот: 863 - 928 МГц
- Посилення: 5 дБі
- Захист навколишнього середовища: поза приміщенням, клас IP67
- Діапазон робочих температур: від -40 до 70°C
- Імпеданс: 50 Ом
- Ширина променя половинної потужності: Н:360°, V:30°
- Поляризація: вертикальна

Для побудови командно-телеметричного каналу зв'язку БПЛА з НКУ мною обрано модуль Microchip RN2483. На його основі існує декілька виконань передавачів, серед яких: PICTAILPLUS LORA BOARD RN2483, який працює на частотах 868 МГц і 433 МГц та модуль RN2483 LORA MOTE, який працює на частоті 868 МГц.

Їх характеристики представлені у таблиці 3.1.:

Таблиця 3.1.

Характеристики модулів LoRa

Назва	Дальність зв'язку, км	Швидкість передачі даних, Кбіт/с	Вага, кг	Розміри, мм	Ціна, \$
RN2483 LORA MOTE	15	300	0.02	17.8×26.7×3	104.98
PICTAILPLUS LORA BOARD RN2483	15	300	0.02	50.8×24.5	98.66

Серед них кращим є PICTAILPLUS LORA BOARD RN2483 (рис. 3.4.), оскільки окрім основного каналу зв'язку на частоті 868 МГц він може працювати на частоті 433 МГц [20]. На основі цього діапазону можна відокремити сигнал для автоматичної системи порятунку для забезпечення більш вірогідного її спрацювання.



Рис. 3.4. Модуль PICTAILPLUS LORA BOARD RN2483

Для дотримання нормативів випромінювання ефективна ізотропна потужність випромінювання (EIRP) бортового передавача не повинна перевищувати 25 мВт для діапазону 868 – 870 МГц.

Тип модуляції – LoRa, що базується на модуляції з розширеним спектром (CSS).

Залежність затухання сигналу на трасі відповідно до відстані між БПЛА та НКУ для частот 433 МГц, 868 МГц та 2.4 ГГц розраховуються за формулою[21]:

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right), \text{ де} \quad (3.1)$$

L – втрати на розповсюдження у вільному просторі, дБ;

D – відстань між передавачем і приймачем, м;

λ – довжина хвилі, м.

Результати розрахунків зображені на рисунку 3.5.:

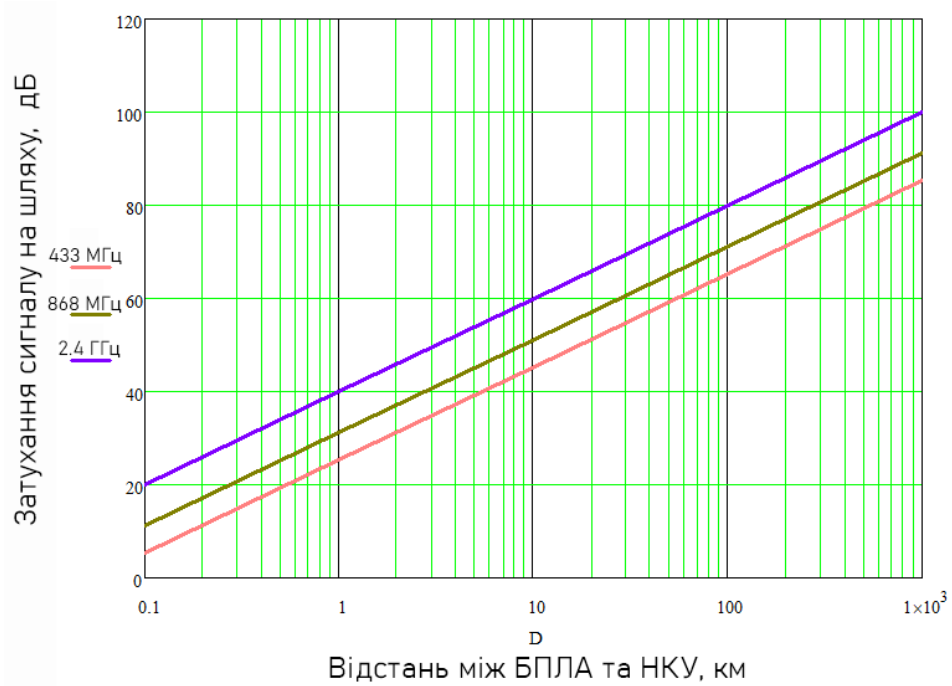


Рис. 3.5. Затування сигналу на трасі

Розрахунок зони Френеля

Вплив кривизни земної поверхні в залежності від відстані між кінцевим пристроєм та шлюзом при радіусі земної поверхні $R = 8504$ км (таблиця 3.2.):

Таблиця 3.2.

Вплив кривизни земної поверхні

Дальність, км	Висота (H), м
0.1	Незначна
0.5	Незначна
1	Незначна
2	Незначна
5	0.4
10	1.5
15	3.3
20	5.9
25	9.2
30	13.2

Як правило, зона Френеля повинна бути вільною від перешкод, але цього можна досягти не завжди, тому вважається, що при блокуванні понад 40% втрата сигналу стане значною. Для розрахунку скористаємося формулою:

$$r = 8.657 * \sqrt{\frac{D}{f}}, \text{ де} \quad (3.2)$$

D – відстань між кінцевим пристроєм та шлюзом, км

f – частота у ГГц

r – радіус зони Френеля, м

H – допуск на кривизну землі, м

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.3. та таблиці 3.4.:

Таблиця 3.3.

Для чистої траси (перекриття зони Френеля 0%)

D, м	D, км	r, м	r + H, м
100	0.1	2.938	2.94
500	0.5	6.57	6.57
1000	1	9.29	9.29
2000	2	13.14	13.14
5000	5	20.77	21.18
10000	10	29.38	30.88

Таблиця 3.4.

Для траси, вільної на 60% (перекриття зони Френеля 40%)

D, м	0.6*D, км	r, м	r + H, м
100	0.06	2.28	2.28
500	0.3	5.09	5.09
1000	0.6	7.2	7.2

Продовження таблиці 3.4.

2000	1.2	10.18	10.18
5000	3	16.09	16.49
10000	6	22.76	24.26

Для найкращої якості радіосигналу: антену шлюзу слід розташувати на відкритому повітрі на висоті (уникаючи перешкод у зоні Френеля).

Окрім цього поляризація антен має бути вертикальною (як для шлюзу, так і для кінцевих пристроїв).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Виконано аналіз системи передавання даних БПЛА – НКУ
2. Проведено вибір комплектуючих пристроїв для мережі передавання даних БПЛА.
3. Запропоновано рекомендації з розгортання мережі LoRaWAN.

ВИСНОВКИ

1. Для управління БПЛА доцільним є використання систем зв'язку з порівняно великою дальністю, наявністю шифрування даних та можливості одночасного використання декількох каналів зв'язку.
2. На сьогоднішній день розвиток технологій автономного управління дозволяє літальним апаратам самотужки виконувати польотне завдання за допомогою автопілоту, проте це не дозволяє говорити про можливість виключення зі складу БПЛА командно-телеметричної радіолінії зв'язку.
3. Основною проблемою залишається забезпечення стійкого, безперервного, оперативного та прихованого управління бортовим обладнанням та корисним навантаженням ТБПЛА у різних умовах (погода, місцевість, радіоперешкоди, протидія противника тощо).
4. Для систем зв'язку невеликих за розміром БПЛА вирішальними факторами при виборі робочого діапазону є маса та габарити бортового приймача та антенно-фідерного пристрою. Доцільним є вибір діапазону надвисоких частот (НВЧ), при цьому антену можна розмістити у профілі крила за рахунок її невеликих розмірів.
5. LoRaWAN – це мережевий протокол із низьким енергоспоживанням та широкою зоною покриття, розроблений для бездротового підключення пристроїв з автономним живленням до мережі Інтернет.
6. Мережна архітектура LoRaWAN розгортається за топологією «зірка», у якій шлюзи ретранслюють повідомлення між кінцевими пристроями та центральним мережевим сервером. Шлюзи підключаються до мережевого сервера через стандартні IP-з'єднання та діють як прозорий міст, перетворюючи RF-пакети в IP-пакети і навпаки.
7. Мережевий протокол LoRaWAN складається з запатентованої технології модуляції на фізичному рівні LoRa (1 рівень моделі OSI) та власне LoRaWAN – що представляє рівень MAC (2 рівень моделі OSI), який

додано для стандартизації та розширення фізичного комунікаційного рівня LoRa як протокол маршрутизації.

8. LoRa базується на модуляції з розширеним спектром chirp spread spectrum modulation (CSS) та різновиді лінійної частотної модуляції, вона дозволяє знизити рівень вихідної потужності передавача, зберігаючи швидкість передачі даних та аналогічний бюджет зв'язку.
9. Виконано аналіз системи передавання даних БПЛА – НКУ.
10. Проведено вибір комплектуючих пристроїв для мережі передачі даних БПЛА.
11. Запропоновано архітектуру мережі LoRaWAN для системи зв'язку земля-БПЛА-земля з наступними характеристиками:
 - Робоча частота – 868 – 870 МГц
 - EIRP (ефективна ізотропна потужність випромінювання) бортового передавача – 25 мВт
 - Пропускна здатність мережі – до 300 Кбіт/с
 - Зона покриття – до 15 км
 - Модуляція – LoRa на основі ЛЧМ
 - Ширина смуги низхідного та висхідного каналів – 500 КГц

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мосов С.П. Особливості застосування тактичної безпілотної розвідувальної авіації у воєнних конфліктах // 2018.
2. Артюшин Л.М., Мосов С.П. Застосування сил і засобів повітряної розвідки наземного противника у сучасних операціях і воєнних конфліктах //2008.
3. Харченко О.В., Кулешин В.В., Коцуренко Ю.В. Класифікація та тенденції створення безпілотних літальних апаратів військового призначення // Наука і оборона. – 2015.
4. U.S. Army Field Manual Interim (FMI) 3-04.155–Department of the Army. – Washington, DC, April, 183 p. <https://www.fas.org/irp/doddir/army/fmi3-04-155.pdf> .
5. Eyes of the Army. The Army Roadmap for UAS 2010-2035. 140 p. <http://www-rucker.army.mil/usaace/uas> .
6. M.L. Cummings, S. Bruni, S. Mercier, and P.J. Mitchell. Automation Architecture for Single Operator, Multiple UAV Command and Control [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://www.dodccrp.org/files/>.
7. Kemaο Penga, Guowei Cai b, Ben M. Chenb,_, Miaobo Dongb, Kai Yew Luma,b, Tong H. Lee. Design and implementation of an autonomous flight control law for a UAV helicopter [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://vlab.ee.nus.edu.sg/>.
8. HaiYang Chao, YongCan Cao, and YangQuan Chen. Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles: A Survey. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://mechatronics.-ece.usu.edu/yqchen/>.
9. David H. Shim, H. Jin Kim, and Shankar Sastry. A Flight Control System for Aerial Robots: algorithms and experiments. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/>.
10. I.H.Johansen. Autopilot Design for Unmanned Aerial Vehicles. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://www.diva-portal.org/smash/>.

11. П.П. Ткачук, Ю.П. Сальник, Ю.М. Пащук, І.В. Матала Система автоматизованого управління польотом і корисним навантаженням тактичних безпілотних літальних апаратів – С. 73.

12. LoRaWAN: global standard for Low Power Wide Area IoT networks. URL: <https://iotbusinessnews.com/download/white-papers/ACTILITY-LoRaWAN-white-paper>.

13. ALOHA Protocol in computer network. Online Courses and eBooks Library. URL: <https://www.tutorialspoint.com/aloha-protocol-in-computer-network>

14. LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL. Semtech LoRa | DEVELOPER PORTAL. URL: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>.

15. LoRa – LoRa documentation. LoRa – LoRa documentation. URL: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#class-c>.

16. Understanding the relationship between LoRa chips, chirps, symbols and bits. Electrical Engineering Stack Exchange. URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/278192/understanding-the-relationship-between-lora-chips-chirps-symbols-and-bits>.

17. What is LoRaWAN Specification - LoRa Alliance®. LoRa Alliance®. URL: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.

18. LoRaWAN regional parameters. ThingPark Market. URL: <https://market.thingpark.com/lorawan-frequency-band>.

19. Cisco Wireless Gateway for LoRaWAN Data Sheet. Cisco. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/datasheet-c78-737307.html>.

20. RN2483 LORA TECHNOLOGY PICTAIL/PICTAIL PLUS DAUGHTER BOARD. www.microchip.com. URL: <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/rn-2483-pictail>.

21. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications / ed. by F. Harris. 3rd ed. Pearson, 2020.