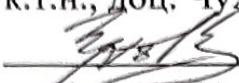


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621:396.24

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях
к.т.н., доц. Чухов В.В.


« 12 » 12, 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Дослідження можливості застосування технології LoRa для
передавання команд керування БПЛА.

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр. ТРМ-22-1


(дата, підпис)

Нестеренко К.О.

Керівник роботи
к.т.н., доц.


(дата, підпис)

Андреев О.В.

Житомир
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему Дослідження можливості застосування технології LoRa для
передавання команд керування БПЛА.

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-22-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Нестеренко К.О.

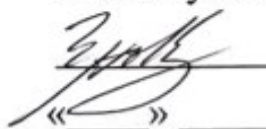
Керівник Андрєєв О.В.

Рецензент Ципоренко В.В.

Житомир
2023

«Затверджено»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

 Владислав ЧУХОВ
« 22 » 2023 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Нестеренко Катерина Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження можливості застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА.

затверджено наказом по університету від «22» листопада 2023 р. № 679

2. Мета дослідження: визначення можливості застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА.

3. Вихідні дані: Частотний діапазон 863 – 870 МГц, ширина спектру радіосигналу -125 кГц, рівень потужності передавача наземного терміналу – 2-14 дБм, фактор розширення спектру – 6,...,12.

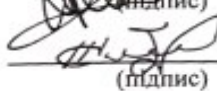
4. Основні задачі дослідження: розробити методику розрахунку дальності зв'язку з БПЛА із застосуванням технології LoRa та визначити взаємозв'язок між дальністю дії радіолінії та інформаційною швидкістю.

5. Термін подання роботи до захисту 2 грудня 2023 р.

6. Дата видачі завдання «30» вересня 2023 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

(підпис)


(прізвище, ініціали)
Нестеренко К.О.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота спрямована на визначення дальності радіолінії зв'язку з БПЛА за допомогою технології LoRa. При початковому частотному діапазоні 863 – 870 МГц, ширині спектру радіосигналу -125 кГц, рівні потужності передавача наземного терміналу визначаються в межах 2-14 дБм та фактору розширення спектру - 6,...,12.

Основною метою є розробка методики розрахунку дальності зв'язку з БПЛА із застосуванням технології LoRa та визначення взаємозв'язку між дальністю дії радіолінії та інформаційною швидкістю.

ANNOTATION

The qualification work is aimed at determining the range of the radio line of communication with the UAV using LoRa technology. With the initial frequency range of 863-870 MHz, the width of the radio signal spectrum -125 kHz, the power levels of the ground terminal transmitter are determined within 2-14 dBm and the spectrum expansion factor - 6,...,12.

The main goal is to develop a methodology for calculating the range of communication with UAVs using LoRa technology and to determine the relationship between the range of the radio line and the information speed.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОБУДОВИ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ КОМАНД БПЛА..	9
1.1 Визначення терміну БПЛА	9
1.2 Класифікація БПЛА.....	10
1.3 Основні вимоги до систем зв'язку з БПЛА.....	16
1.4 Огляд сучасних існуючих БПЛА	25
1.5 Варіанти використання БПЛА.....	29
Висновки до розділу 1	31
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa.....	33
2.1 Історія появи технології LoRa	33
2.2 Загальні відомості технології LoRa	34
2.3 Принципи та характеристики модуляції технології LoRa.....	36
2.4 Безпека мережі та швидкість передачі даних технології LoRa.....	42
2.5 Технічні особливості технології LoRa.....	43
Висновки до розділу 2	45
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ДАЛЬНОСТІ РАДІОЛІНІЇ.....	46
3.1 Методика розрахунку дальності передавання команд керування БПЛА з використанням технології LoRa.....	46
3.2 Розрахунок дальності дальності передавання команд керування БПЛА з використанням технології LoRa.....	48
3.3 Аналіз отриманих результатів.....	54
3.4 Дослідження інформаційної швидкості радіолінії	55
ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	58

РЕФЕРАТ

Атестаційна магістерська робота присвячена дослідженню можливості застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА.

Дипломна магістерська робота містить 60 сторінок, 26 рисунків, 5 таблиць, 20 джерел посилання.

У першому розділі проведено аналіз дослідження та використання БПЛА. У другому розділі розглянуто основи технології LoRa. У третьому розділі розроблено методика розрахунку дальності радіолінії зв'язку з БПЛА за допомогою технології LoRa. У четвертому розділі проведені розрахунки та проаналізовані отримані результати.

Метою дослідження є визначення можливості застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА.

Об'єктом дослідження є радіолінія керування БПЛА.

Предметом дослідження є застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА.

Наукова новизна дослідження полягає в поєднанні технології LoRa з безпілотними літальними апаратами і вивченні можливостей використання цієї комбінації для передавання команд керування. Дослідження такого роду є позитивним кроком у напрямку розвитку управління БПЛА та подальшого вдосконалення їх функціональності.

Практичне значення одержаних результатів вказує на ефективність використання технології LoRa для передавання команд керування БПЛА, оскільки забезпечує більшу дальність передавання, технологія має низьке енергоспоживання, що дозволяє економити батарейний заряд БПЛА та забезпечувати більший тривалий час польоту, забезпечує підвищену стійкість до перешкод.

Для досягнення основної мети у магістерській роботі розв'язуються такі часткові задачі:

- аналіз побудови радіолінії передачі команд керування БПЛА;

- аналіз принципів побудови технології LoRa;
- аналіз існуючих методів визначення довжини радіолінії;
- розробка методу розрахунку дальності зв'язку з БПЛА із застосуванням технології LoRa;
- визначення взаємозв'язку між дальністю дії радіолінії та інформаційною швидкістю.

Результати магістерської роботи доповідались та обговорювалися на VI всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» у м. Житомир 29-30 листопада 2023 р. [1].

Ключові слова: БПЛА, LoRa, дальність зв'язку.

ВСТУП

В наш час розвиток систем передачі команд управління на відстань є надзвичайно важливим. Аспекти безпеки та швидкість передавання команд також мають суттєве значення. Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) знаходять все більше застосувань у різних сферах людської діяльності. Якщо раніше вони використовувалися переважно для військових цілей, то на сьогоднішній день вони є потребою й у цивільних галузях, таких як сільське господарство та спостереження за дикими тваринами, тощо [1].

Технологія LoRa (Long Range) має потенціал стати прогресивним інструментом для передавання команд керування БПЛА, оскільки вона забезпечує великий віддалений зв'язок та енергоефективність. Таким чином, дослідження застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА є актуальним.

Використання технології LoRa для передавання команд керування безпілотними літальними апаратами має декілька переваг порівняно з Wi-Fi, GPS та іншими технологіями, такими як: дальність передачі сигналу без необхідності встановлення додаткових повторювачів сигналу; низька споживання енергії, в порівнянні з Wi-Fi та іншими бездротовими технологіями, це особливо важливо для БПЛА, де продовжена тривалість польоту є критичною; широке покриття мережі та забезпечення доступності де Wi-Fi або GPS може бути обмеженою; висока стійкість.

Отже, ціллю роботи є розробка методу розрахунку дальності зв'язку з БПЛА із застосуванням технології LoRa та визначити взаємозв'язок між дальністю дії радіолінії та інформаційною швидкістю.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОБУДОВИ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ КОМАНД БПЛА

1.1 Визначення терміну БПЛА

Існує безліч термінів, які використовуються для опису літальних апаратів, що здійснюють польоти без пасажирів.

Термін «дрон» використовувався з перших днів авіації, застосовуючи його до дистанційно керованих літальних апаратів-мішеней, які використовувалися для відпрацювання стрільб із гармат лінійного корабля, таких як Fairey Queen 1920-х років і de Havilland Queen Bee 1930-х років. Пізніші приклади включали Airspeed Queen Wasp і Miles Queen Martinet, перш ніж їх остаточно замінив GAF Jindivik. Термін залишається загальновживаним. Окрім програмного забезпечення, автономні дрони також використовують безліч передових технологій, які дозволяють їм виконувати свої місії без втручання людини, таких як хмарні обчислення, комп'ютерне бачення, штучний інтелект, машинне навчання, глибоке навчання та термосенсиори. Для рекреаційних цілей дрон для аерофотозйомки – це літальний апарат, який має відео від першої особи, автономні можливості або обидва.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) визначається як «механічний літальний апарат, який не має людини-оператора, використовує аеродинамічні сили для забезпечення підйомної сили транспортного засобу, може літати автономно або керуватися дистанційно, може бути одноразовим або відновлюваним, і може нести летальний або нелетальний корисний вантаж». БПЛА – це термін, який зазвичай застосовується до військових випадків. Ракети з боєголовками, як правило, не вважаються БПЛА, оскільки транспортний засіб сам по собі є боєприпасом, але певні типи гвинтових ракет громадськість і засоби масової інформації часто називають «дронами-камікадзе». Крім того, зв'язок БПЛА з дистанційно керованими літальними моделями неясний, БПЛА можуть включати або не включати дистанційно керовані моделі літальних апаратів [2].

1.2 Класифікація БПЛА

Для розробки та практичного застосування безпілотних літальних апаратів, важливим вважається проведення досліджень щодо класифікації таких апаратів.

Основними класифікаційними ознаками, згідно рис. 1.1 та рис. 1.2, є: за типом системи управління, за масою, за масштабом завдань, за паливною системою, за типом крила, за тривалістю польоту, за практичною стелею польоту, за типом літального апарату, за базуванням, за правилами польотів, за кількістю використань, за типом паливного баку, за радіусом дії, за максимальною швидкістю польоту, за кількістю двигунів, за використанням, за напрямком підйому/посадки, за типом підйому/посадки, за часом одержання зібраної інформації.

Тип системи управління визначає вид БПЛА. Дистанційно пілотовані літальні апарати керуються безпосередньо оператором в межах видимості через наземну станцію. Вони обладнані цифровим каналом передачі даних, які можуть передаватися на землю в режимі реального часу в межах прямої видимості або через супутниковий канал зі швидкістю до 50 Мбіт/с. Дистанційно керовані працюють автономно, але можуть керуватися пілотом, який використовує лише зворотній зв'язок через інші підсистеми контролю. Такі літальні апарати містять аналоговий та цифровий канали, причому перший забезпечує стабільну передачу інформації на відстань до 40 км, а другий – до 15 км. Автоматичні літальні апарати виконують попередньо запрограмовані дії. На БПЛА такого типу розміщується комплексні системи автоматичного пілотування з GPS приймачами, гіроскопами, акселерометрами, різноманітними датчиками, що дозволяє працювати в режимі реального часу та передавати дані по каналу зв'язку з частотою 1 МГц. Дистанційно керовані авіаційні системи керуються вбудованими системами, наприклад UASAnalyzer.

Маса БПЛА поділяє їх на малорозмірні – до 200 кг, середньорозмірні – 200–2000 кг, великорозмірні – 2000-5000 кг, важкі – більше 5000 кг.

БПЛА за масштабом завдань, які вирішуються, поділяються на тактичні, тобто дальність їх польоту не перевищує 80 км, оперативно-тактичні – до 300 км, оперативно-стратегічні – до 700 км.

Паливна система БПЛА виділяє їх на такі види: монозаправні – одноразова заправка паливної системи, яка виконуються в промислових умовах виробником на заводі, полізаправні – багаторазова заправка, яка може, в свою чергу, бути наземною – виконується на землі, платформна – морська (на борту морського судна) та бортова (на борту пілотованого літального апарату). Монозаправні літальні апарати споживають від 4 до 25 кг палива, тоді як полізаправні зазвичай живляться від паливних елементів та акумуляторів.

БПЛА за типом крила поділяються на фіксовані – літакового (забезпечує швидкість польоту близько 50-60 км/год) та гелікоптерного (забезпечує швидкість польоту близько 100 км/год) типів, плаваючі – використовуються в конвертипланах (дозволяє виконувати вертикальний зліт/посадку і має можливість фізично повертати двигуни або пропелери на 90 градусів для створення вертикальної підйімальної сили або горизонтальної тягової).

Тривалість польоту БПЛА різна і поділяє їх на малої тривалості – менше 6 год, середньої тривалості – 6–12 год, великої тривалості – більше 12 год.

Практична стеля польоту БПЛА виділяє їх на маловисотні – менше 1 км, середньовисотні – 1–4 км, висотні – 4–12 км, стратосферні – більше 12 км.

Літальні апарати за типом поділяються за літаковою аеродинамічною схемою, за гелікоптерною аеродинамічною схемою та легші за повітря. Зазвичай літакова схема передбачає більшу тривалість та дальність польоту БПЛА – більше 12 год та не менше 1500 км, відповідно, та мають більшу швидкість (можуть навіть перевищувати швидкість звуку). В той самий час гелікоптерна схема забезпечує більшу маневреність літального апарату.

БПЛА за базуванням поділяються на наземні, які пересуваються по земній поверхні, морські, орієнтовані на роботу у водному середовищі, та космічні, орієнтовані на вихід у космос. Літальні апарати наземного базування розраховані

на досить великий радіус дії – не менше 1500 км, морського базування для значно менших відстаней – до 300 км, а космічні – понад 100 км.

БПЛА згідно правил польотів поділяються на візуальні, якщо вони знаходяться і виконують політ в межах видимості пілота, який керує і контролює їх в світлий час доби (5 км); приладовий, якщо політ виконується в автоматичному режимі не лише в межах видимої зони, але й в сліпих зонах в темний час доби (понад 150 км); візуально приладовий, коли під час польоту використовуються візуальні та приладові прийоми (5 – 150 км).

БПЛА за кількістю використань поділяються на одноразові, якщо не передбачена система посадки, та багаторазові, які використовуються велику кількість разів (понад 10 разів) і можуть вирішувати різні задачі.

Тип паливного баку БПЛА є важливою конструкторською характеристикою, що визначає базові літальні апарати, які мають основний паливний бак, та базово-резервні – мають основний та резервний паливні баки. Додаткові паливні баки дозволяють збільшувати дальність (до 2000 км) та тривалість польоту (до 24 год).

Радіус дії БПЛА варіюється в широких межах. Виділяють п'ять основних видів: ближнього радіусу дії – до 40 км, малого – до 70 км, середнього – до 300 км, дальнього – до 1500 км, великої дальності польоту – не менше 1500 км.

За максимальною швидкістю польоту БПЛА поділяються на замало швидкісні – до 100 км/год, малошвидкісні – від 100 до 300 км/год, середньошвидкісні – від 300 до 600 км/год, надзвукові – перевищують швидкість звуку до 5 разів.

БПЛА за кількістю двигунів поділяються на одnodвигунні, дводвигунні, багатодвигунні, бездвигунні. В залежності від типу та кількості двигунів потужність цих літальних апаратів може досягати 3 МВт (близько 4 тис. к.с.). БПЛА широко використовуються в усіх сферах людської діяльності, які в загальному можна поділити на: військові та цивільні. Цивільні поділяються на державні, приватні, комерційні.



Рисунок 1.1 – Класифікація безпілотних літальних апаратів

В той самий час серед військових виділяють ударні, винищувальні, розвідувальні, багатоцільові. Ці БПЛА різняться багатьма параметрами, причому зазвичай військові мають більшу потужність, радіус дії, тривалість польоту тощо. Цивільні БПЛА конструктивно масово представлені у вигляді квадрокоптерів, найпотужніші з яких мають швидкість 160 км/год, максимальну висоту 3000 м, корисне навантаження не більше 100 кг та потужність 140 к.с

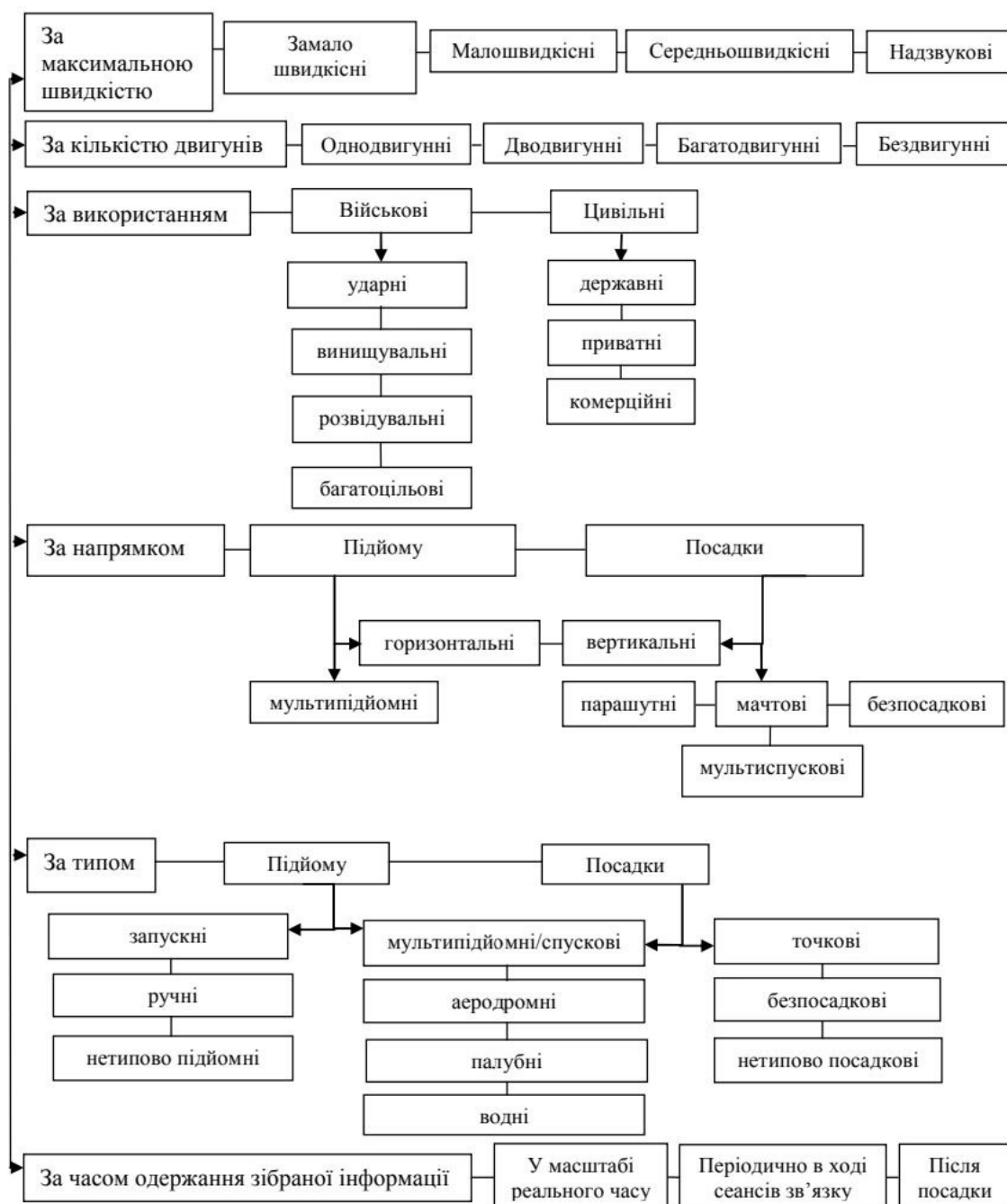


Рисунок 1.2 – Продовження класифікації безпілотних літальних апаратів

БПЛА за напрямком підйому/посадки поділяються на горизонтальні та вертикальні. Також виділяють мультипідйомні та мультиспускові літальні апарати, тобто ті, напрям руху яких не залежать від поверхні, з якої здійснюється підйом чи посадка. Крім того, за посадкою виділяють мачтові, парашутні та безпосадкові БПЛА. Останні зазвичай є одноразовими та розраховані на малий радіус дії – до 10 км.

За типом підйому/посадки: мультипідйомні/спускові, аеродромні, палубні, водні. Мультипідйомні/спускові БПЛА не залежать від поверхні, з якої

здійснюється підйом чи посадка. Крім того, за типом підйому виділяють запускні, ручні та нетипово підйомні, а за типом посадки – точкові, безпосадкові та нетипово посадкові. Нетипово підйомні та посадкові БПЛА – це літальні апарати, які не мають вищенаведені особливості запуску. На підйом/посадку значно впливає швидкість вітру біля землі, яка не повинна перевищувати 15 м/с.

БПЛА часом одержання зібраної інформації: у масштабі реального часу, періодично в ході сеансів зв'язку, після посадки. Передача даних в режимі реального часу вимагає наявності в конструкції БПЛА цифрового каналу з мінімальною швидкістю передачі 1 МБіт/с. В інших типах достатньо аналогового каналу та/або запам'ятовуючого пристрою [3].

Безпілотні (англ. unmanned – без людини на борту) літальні апарати, відповідно до стандартів НАТО, так само, як і літаки із пілотом на борту (manned aircraft), керуючись значенням повної злітної маси розділено на 3 класи:

- I – повна злітна маса до 150 кг;

Клас I поділяється на категорії:

- ✓ мікро – до 2 кг;
- ✓ міні – до 15 кг;
- ✓ малі – від 15 кг (JDN 2/11 2011, р. 2-7)

- II – повна злітна маса до 600 кг;

Клас II має одну категорію – тактичні.

- III – повна злітна маса більше 600 кг. (JDN 2/11 2011, р. 2-5)

Клас III поділяється на категорії:

- ✓ Ударні;
- ✓ HALE;
- ✓ MALE.

Класифікацію безпілотних авіаційних систем (UAS), наведено в документі Департаменту оборони США (DOD-USRM-2013 2013, р. 6). Згідно цього документу, вирізняють п'ять груп UAS:

- Група 1 (мікро-, міні тактичні) – від 0 до 9 кг, до 300 метрів над ґрунтом, основний представник – «RQ-11 Raven».

- Група 2 (малі тактичні) – від 9.5 до 25 кг; до 1000 метрів над ґрунтом, представник – «Scan Eagle».
- Група 3 (тактичні) – менш, ніж 600 кг, представник – «RQ-7 Shadow».
- Група 4 (персистентні) – більш, ніж 600 кг; представник – «MQ-1B Predator».
- Група 5 (пенетрувальні) – більш, ніж 600 кг; представник – «MQ-9 Reaper» [4].

1.3 Основні вимоги до систем зв'язку з БПЛА

Тактичні розвідувальні БПЛА призначені для забезпечення розвідувальною інформацією частин і з'єднань сухопутних військ і військово-морських сил від корпусної ланки і нижче.

У європейських країнах НАТО для тактичних розвідувальних БПЛА як визначального параметра розглядається їх радіус дії, відповідно до якого вони поділяються на середнього (від 70 до 200 і більше км), малого (до 50-70 км) і над малого (до 10-20 км) радіусів дії.

Бойові БПЛА включають спеціалізовані ударні апарати багаторазового та одноразового застосування. Спеціалізовані ударні БПЛА багаторазового застосування мають бойовий радіус дії до декількох тисяч кілометрів; ударні БПЛА одноразового застосування характеризуються тривалістю польоту до 5 годин і бойовим радіусом дії до 350 км [5].

Знищення БПЛА пов'язано з низкою складнощів у справі виявлення і ураження цілі. Тому в обговореннях методик протидії такій техніці дуже часто пропонується альтернатива знищенню - придушення радіоелектронних систем. Деякі сучасні безпілотники мають можливість автономного виконання тих чи інших завдань, проте майже вся подібна техніка управляється оператором, а команди передаються по радіоканалу. Таким чином, придушення каналу керування засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) здатне, як мінімум, перешкодити виконанню завдання.

Лінія радіозв'язку БПЛА і наземного пункту управління (НПУ) забезпечує в загальному випадку двосторонній обмін інформацією між бортовою і наземною апаратурою. Основні завдання, які вирішуються зазначеною лінією зв'язку, є:

- в напрямку НПУ-БПЛА – передача командної інформації для здійснення управління польотом БПЛА і роботою цільового бортового обладнання;
- в напрямку БПЛА-НПУ – передача телеметричної інформації, передача спеціальної інформації, отриманої за допомогою цільового устаткування (фотознімки, ТВ зображення та ін.).

Командний радіоканал призначений для передачі сигналів керування БПЛА з пункту управління на його бортову апаратуру, яка відпрацьовує отримані команди керування. За цими командами БПЛА робить різного роду маневри, змінює висоту, курс і швидкість польоту, а також відпрацьовується зміна режимів роботи розвідувальної та іншої апаратури. Радіолінії НПУ-БПЛА і БПЛА-НПУ істотно розрізняються по пропускній здатності: командний радіоканал НПУ-БПЛА характеризується невеликою швидкістю передачі інформації. Необхідна швидкість передачі інформації в цьому каналі в будь-якому випадку не перевищує кількох десятків Кбіт/сек.

Радіолінія БПЛА-НПУ повинна мати, як правило, значно більшу пропускну здатність. Конкретне значення необхідної швидкості передачі значною мірою визначається призначенням конкретного апарату і показниками встановленого на ньому цільового устаткування. Наприклад, при передачі команднотелеметричних даних ймовірність бітової помилки буде не більше 10^{-6} , а швидкість передачі цих даних буде не більше 56 Кбіт/с. А ось при передачі даних корисного навантаження ймовірність бітової помилки буде вже не більше 10^{-3} , а швидкість передачі даних корисного навантаження буде від 1 до 20 Мбіт/с.

Вибір робочого частотного діапазону радіоканалу зв'язку обумовлюється кількома факторами:

- вимогами до маси, габаритам і споживання приймально-передавального пристрою БПЛА;

- необхідною дальністю роботи при заданій ймовірності бітової помилки;
- можливістю отримання ліцензії на роботу в необхідному діапазоні або можливістю безліцензійної роботи.

Для систем зв'язку малих БПЛА вирішальними факторами при виборі частотного діапазону є маса і габарити бортового приймача і антенно-фідерного пристрою (АФП). Доцільним є вибір діапазону надвисоких частот (НВЧ), при цьому вдається створити антену малих розмірів, здатну розміститися в профілі крила. Щільне компонування об'єктів всередині малого БПЛА не дозволяє ефективно використовувати приймачі великої потужності з укороченими антенами ультракороткохвильового діапазону (УКХ) внаслідок проблем з електромагнітною сумісністю і великим впливом навколишніх об'єктів на характеристики антени [5].

До систем зв'язку БПЛА середнього і великого класу пред'являються більш жорсткі вимоги по дальності роботи, перешкодозахищеності та ймовірності бітової помилки. У цьому випадку є можливим і оптимальним комплексування декількох каналів зв'язку, що працюють в різних частотних діапазонах (рис. 1.3).

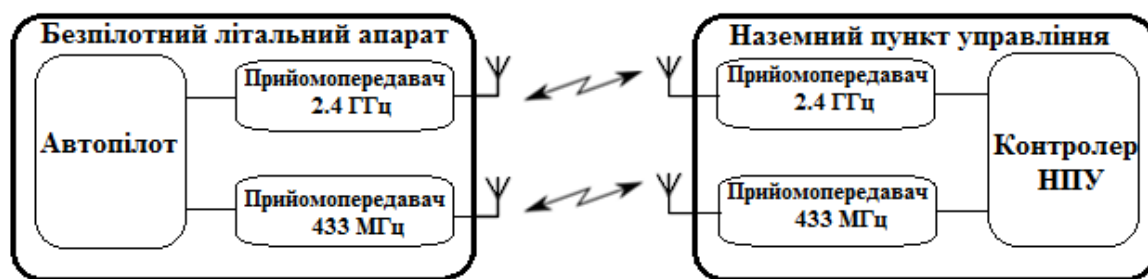


Рисунок 1.3 – Приклад комплексування радіоканалів зв'язку

У процесі роботи системи зв'язку (рис. 1.3) оцінюються ймовірності бітової помилки для кожного каналу зв'язку і приймається рішення про розподіл командно-телеметричного потоку даних між каналами. Використання декількох каналів зв'язку підвищує надійність системи передачі даних і в цей же час є надлишковим з точки зору ефективного використання радіочастотного спектру.

Як правило, максимальна відстань для прямого радіозв'язку між БПЛА цивільного призначення та НПУ на сьогоднішній день складає не більше 100 км.

Втрати при поширенні сигналу. Великомасштабні завмирання являють собою середнє ослаблення потужності сигналу або втрати на трасі при проходженні трас великої протяжності. Втрати на трасі і затінення - ось два основних механізми, які призводять до ефектів завмирань великого масштабу. Середні втрати радіосигналу на трасі визначаються за формулою [6]:

$$L(d)[\partial B] = L(d_0)[\partial B] + 10\gamma \lg(d/d_0) + X_\sigma, \quad (1.1)$$

де $L(d)$ – середні втрати на трасі прямої видимості при еталонній відстані d_0 у вільному просторі;

d – це відстань між передавачем і приймачем;

γ – експозента втрати на трасі, яка залежить від навколишнього середовища;

X_σ – логарифмічно нормальне завмирання внаслідок затінення.

У безпілотних літальних системах еталонна відстань обирається рівною робочій висоті БПЛА. Середні втрати $L(d_0)$ при поширенні у вільному просторі розраховуються за формулою [6]:

$$L(d_0)[\partial B] = 10 \lg(4\pi d_0/\lambda)^2, \quad (1.2)$$

де λ - довжина хвилі сигналу.

Якщо відстань d_0 і частота f ($f = c/\lambda$, c – швидкість світла) вимірюються в кілометрах і мегагерцах відповідно, то з рівнянь (1.1) і (1.2), отримуємо наступне (при $X_\sigma = 0$) [7]:

$$L(d)[\partial B] = 10\gamma \lg(d) + (20 - 10\gamma) \lg(d_0) + 20 \lg(f) + 32,45, \quad (1.3)$$

Розрахуємо втрати на трасі в залежності від відстані між БПЛА і НПУ для різних частот (0,9 ГГц; 2,4 ГГц; 5,8 ГГц). Отримаємо декілька значень, які занесені на графік (рис.1.4) [5].

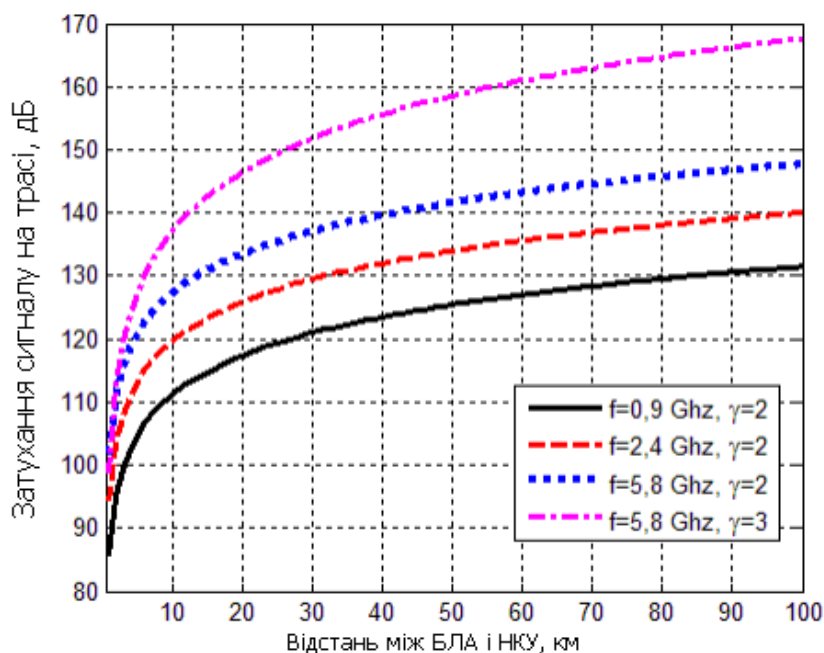


Рисунок 1.4 – Затування сигналу на трасі в залежності від відстані між БПЛА і НПУ для трьох різних частот

З рис.1.4. видно, що при відстані між БПЛА і НПУ 30 км затування сигналу у вільному просторі в діапазонах 0,9 ГГц; 2,4 ГГц і 5,8 ГГц рівні 121 дБ, 130 дБ і 136 дБ відповідно. У гірших умовах поширення ($\gamma = 3$) затування сигналу сильно збільшується. Для компенсації такого ослаблення сигналу можна використовувати різні способи, в тому числі підвищення коефіцієнта посилення антен (головним чином, наземної), використання енергетично вигідних видів модуляції, підвищення вихідної потужності передавачів (до максимально дозволеної).

Розглянемо можливі ситуації взаємного розташування БПЛА та НПУ (рис.1.5). БПЛА може знаходитись в зоні видимості (БПЛА №1), або в зоні півтіні (БПЛА №2), або в зоні тіні (прийом в цій зоні може бути здійснений тільки завдяки дифракції сигналу на земній поверхні).

Максимальна дальність радіозв'язку визначається за формулою [5]:

$$d_{LOS} = \sqrt{2 \cdot R_3 \cdot h_1 + h_1^2} + \sqrt{2 \cdot R_3 \cdot h_2 + h_2^2}, \quad (1.4)$$

де h_1 – висота підйому наземної антени, м;

h_2 – висота підйому бортової антени, м;

d_{LOS} – гранична дальність прямої видимості, км;

R_z – радіус Землі ($R_z = 6400$ км для високих радіочастот).

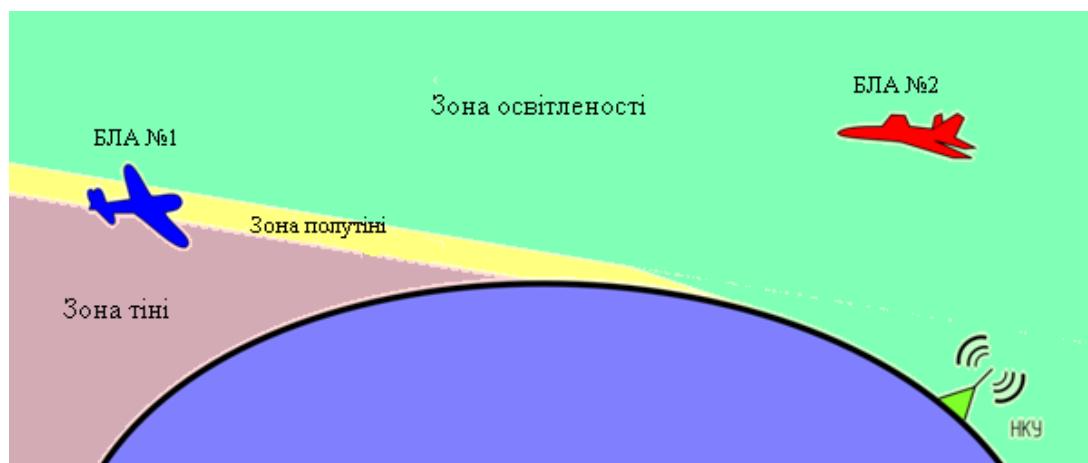


Рисунок 1.5 – Зони освітленості, півтіні і тіні

А на рис. 1.6 показана залежність максимальної дальності радіозв'язку від висоти польоту БПЛА при деяких заданих висотах підйому антени НПУ. Антена НПУ є мобільною і встановлюється на висоті не більше 10 м (типово 2-4 м). При висоті польоту БПЛА 1000 м граничну відстань прямої видимості між БПЛА і НПУ менше 140 км. Розрахунки показують, що для отримання дальності зв'язку 600 км БПЛА повинен працювати на висоті більше 20 000 м. Отже, для великої відстані зв'язку необхідно використання або супутникового зв'язку, або іншого БПЛА в якості ретранслятора.

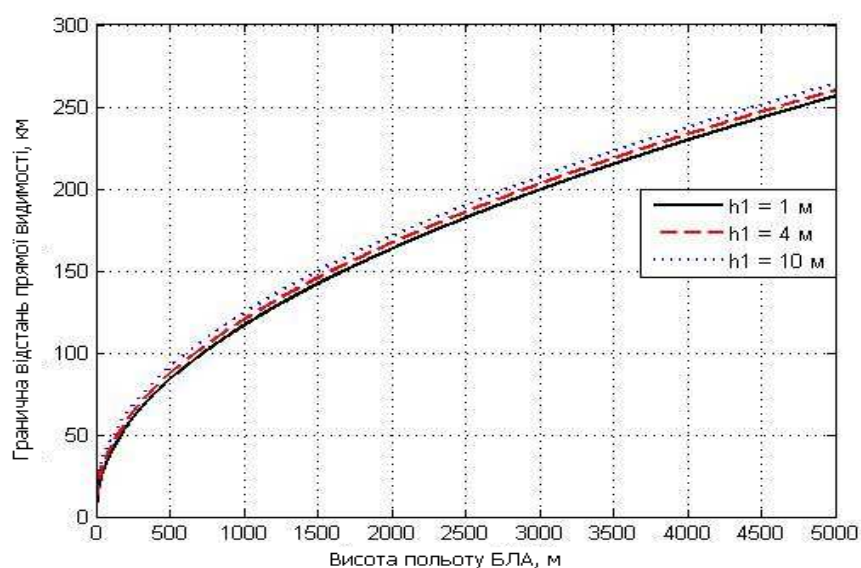


Рисунок 1.6 – Максимальна дальність зв'язку в залежності від висоти підйому антен БПЛА та НПУ

З рис.1.6 випливає, що залежність граничної дальності зв'язку від висоти підйому антени НПУ (у діапазоні 1 - 10 м) слабка, тому висота щогли для установки наземної антени визначається необхідністю зниження впливу багатопроміневої, з урахуванням можливих перешкод на шляху поширення сигналу (рельєф місцевості, забудова) .

Дальність радіозв'язку прямої видимості визначається як [6] :

$$d_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1.5)$$

де h_1 – висота підйому першої антени, м;

h_2 – висота підйому другої антени, м;

Основною вимогою при створенні системи зв'язку з БПЛА є забезпечення можливості передачі даних із заданою швидкістю і ймовірністю помилки при великих відстанях між БПЛА і НПУ. Для порівняння енергетичної ефективності, на рис.1.7 показано декілька видів модуляції по каналу з гаусівським шумом.

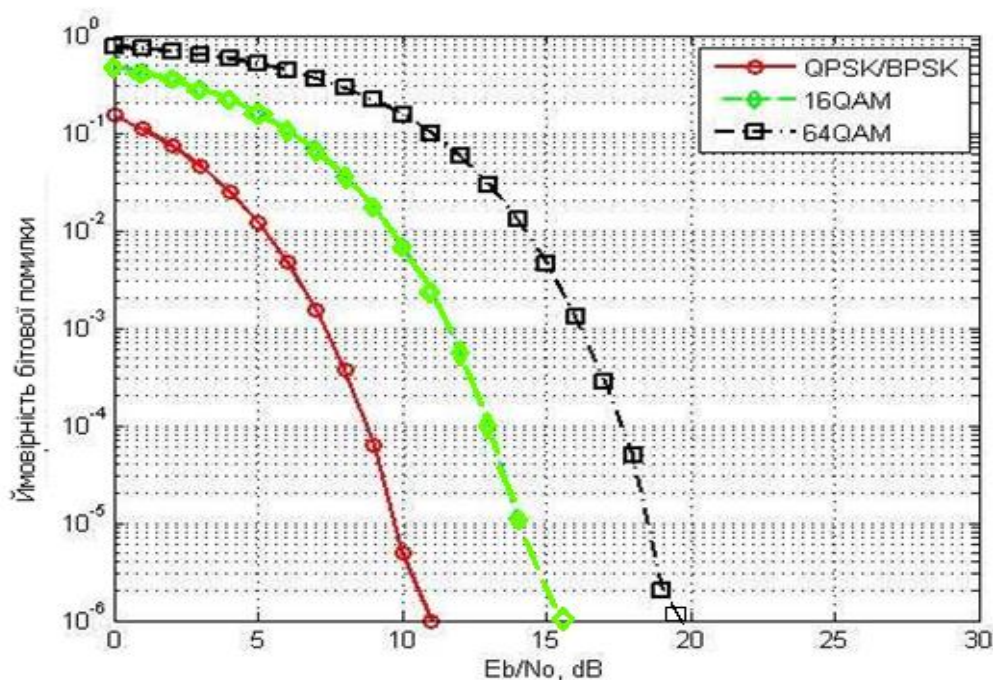


Рисунок 1.7 – Ймовірність бітової помилки для різних видів модуляції

З рис. 1.7 випливає, що зі збільшенням позиційності модуляції ймовірність бітової помилки збільшується, тобто, для підтримки заданого рівня бітової помилки необхідно збільшувати відношення сигнал / шум (ВСШ) на вході приймача. Тому доцільним є використання багатопозиційної модуляції тільки при

малих відстанях між БПЛА і НПУ для передачі більшого обсягу інформації без зміни ширини смуги частот. Для забезпечення максимальної дальності зв'язку необхідно використовувати енергетично найвигідніші види модуляції - такі як двійкова фазова маніпуляція (BPSK) і квадратурна фазова маніпуляція (QPSK). Як видно з рис. 1.4, при зміні відстані між БПЛА і НПУ в широких межах (500 м - 30 км) потужність сигналу з несучою 2,4 ГГц на вході приймача буде змінюватися близько 35 дБ. Такий великий енергетичний запас дозволяє використовувати різні види модуляції для підвищення швидкості передачі даних з БПЛА на НПУ при підтримці ймовірності бітової помилки на заданому рівні. Реалізація даного підходу вимагає створення алгоритмів адаптивної зміни схеми модуляції і кодування цифрової системи зв'язку [5].

Аналіз каналу зв'язку має на увазі проведення розрахунків корисної потужності сигналу і потужності шуму в приймачі з урахуванням всіх етапів передачі радіосигналу. Одразу розглянемо залежність згасання сигналу від відстані між БПЛА і НПУ для двох частот (рис. 1.8).

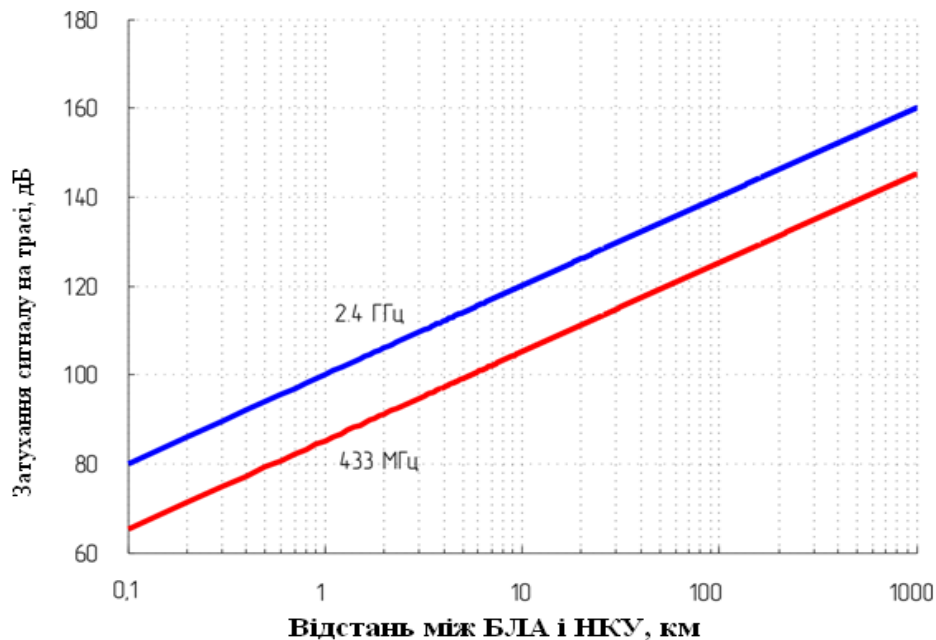


Рисунок 1.8 – Згасання сигналу на трасі в залежності від відстані між БПЛА і НПУ для двох різних частот

Втрати радіосигналу на трасі розраховуються за формулою (1.2) [6]. І як видно з рис.1.8, згасання сигналу в діапазоні 2,4 ГГц при відстані між БПЛА і

НПУ 30 км складе 130 дБ. Для компенсації такого затухання необхідно використовувати всі можливі способи, в тому числі підвищення коефіцієнта посилення антен (головним чином, наземної), використання енергетично вигідних видів модуляції (рис. 1.7), підвищення вихідної потужності передавачів до максимально дозволеної.

Для цифрового зв'язку ймовірність помилки залежить від відношення енергії біта (E_b) до спектральної щільності потужності шуму (N_0) в приймальному пристрої, що визначається виразом [6]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R}{P_{ш}} \left(\frac{W}{R} \right), \quad (1.6)$$

де P_R – потужність прийнятого сигналу;

$P_{ш}$ – потужність шуму;

W – ширина смуги пропускання;

R – швидкість передачі біта в секунду.

Одним з найважливіших показників якості каналу є залежність ймовірності появи помилкового біта P_R від E_b/N_0 між реальним (прийнятим) і потрібним відносинами E_b/N_0 енергетичний резерв лінії зв'язку (або бюджет каналу зв'язку):

$$M(\partial B) = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{прийн}} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{потр}}, \quad (1.7)$$

Потужність, прийнята приймальною антеною визначається виразом [6]:

$$P_R(d)(\partial B) = P_T(\partial B) + G_R(\partial B) + G_T(\partial B) - L_s(\partial B) - L_0(\partial B), \quad (1.8)$$

де G_R і G_T – коефіцієнти підсилення передавальної і приймальні антен;

P_T – передана потужність;

L_0 – коефіцієнт втрат системи, не пов'язаних з поширенням (втрати у фідері і роз'ємах НПУ та БПЛА, поляризаційне неузгодження антен);

L_s – втрати в тракці.

З рівнянь (1.6), (1.7) і (1.8), отримуємо наступне:

$$M(\partial B) = P_T(\partial B) + G_R(\partial B) + G_T(\partial B) - L_s(\partial B) - L_0(\partial B) - P_s(\partial B), \quad (1.9)$$

де P_s – чутливість приймача, дБ.

Енергетичний запас M використовується для компенсації цих завмирань.

1.4 Огляд сучасних існуючих БПЛА

Серед наявних сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) можна виділити наступні моделі.

A1-СМ «Фурія» - український безпілотний авіаційний комплекс розвідки та корегування вогню артилерії. Розроблений у 2014 році київським підприємством «Атлон Авіа».



Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд A1-СМ «Фурія»

Технічні характеристики:

- Злітна маса: 5,5 кг;
- Максимальна радіус: до 50 км;
- Дальність польоту: близько 200 км від вильоту до повернення;
- Швидкість: Крейсерська – 65 км/год;

Найбільша: до 130 км/год [8].

Комплекс містить три БПЛА, три денні модулі корисного навантаження і два нічні модулі корисного навантаження, наземну станцію керування і обробки інформації, антени та додаткове обладнання.

Конструкція планера «літне крило» (склотканина і карбон). Може перебувати в повітрі до трьох годин. Силавий агрегат електричного типу. Живлення забезпечують дві батареї по 16 А/год. Завдяки моніторам оператор може стежити за геоінформаційною системою з прив'язкою координат і GPS-позицій літака. Другий монітор призначений для ведення спостереження оптичною камерою в режимі дійсного часу.

Політ з можливістю зміни маршруту під час місії; режим керування польоту камерою; зашифрований цифровий командний рядок AES256; автономний політ і повернення в злітну зону без використання супутникових навігаційних систем, підтримка GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou.

Лелека-100 український безпілотний літальний апарат, призначений для ведення розвідки. Створений українською компанією DeViro. Прийнятий на озброєння Збройних Сил України в травні 2021 року.



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд БПЛА Лелека-100

Тактико-технічні характеристики:

- Розміри повітряного апарату: 1980 мм / 1135 мм;
- Злітна вага: $5 \pm 0,5$ кг;
- Матеріал: композит скло–вугле волокно;
- Мотоустановка: електрична;
- Максимальна висота польоту: 1500 м;
- Температурний діапазон: -20С до +40С;
- Спротив вітру: до 20 м/с;
- Крейсерська швидкість: 60 – 70 км/год;
- Гарантована довжина маршруту: 100 км;
- Максимальна швидкість: 120 км/год;
- Час знаходження у повітрі: 1.5...4 години;

- Керування: 30-50 км двосторонній цифровий канал із шифруванням;
- Програмування: візуальний режим по супутниковим мапам;
- Система забезпечення польоту: автопілот з автоматичним режимом польоту та навігації [9] ;

- Система протидії засобам РЕБ: система автоматично виявляє намагання упередженого перешкоджання сигналу GPS та спроби зміни навігаційних налаштувань;

- Цільове спорядження: дистанційно керований модуль з 4-х кратним (16) оптичним збільшення; модуль тепловізійний – 640 × 480, 50Гц;

- Канал відеоданих дистанційне керований: аналоговий канал (720 × 576) – до 40 км;цифровий канал (1080p full HD) – до 15 км [9].

АСУ-1 «Валькірія» – безпілотний авіаційний комплекс військового та цивільного призначення для забезпечення моніторингу, повітряної розвідки, відеоспостереження та корегування артилерійського вогню вдень та вночі. Виробляється ТОВ «Авіаційні системи України» (м. Київ).

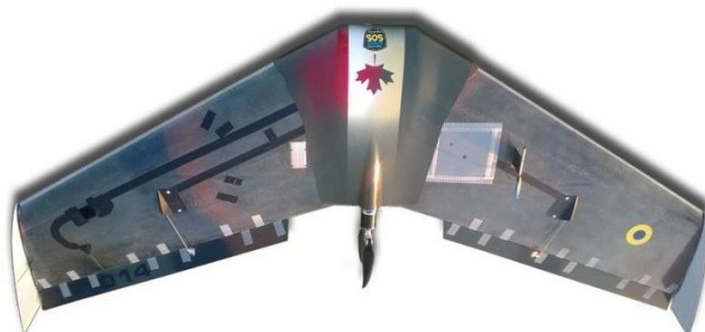


Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд АСУ-1 «Валькірія»

Тактико-технічні характеристики:

- Тип: літаюче крило;
- Максимальна злітна вага: 3,5 кг;
- Розмах крил: 1,6 м;
- Двигун: електричний;
- Радіус дії: до 34 км;
- Час польоту: близько 120 хвилин;

- Максимальна швидкість: 108 км/год;
- Практична стеля: 2000 м [10].

У складі корисних навантажень містяться: камера 4k, тепловізор, автопілотна система, яка базується на програмному забезпеченні з відкритим кодом та відкритій апаратній платформі: Pixhawk, Ardupilot і Mission Planner. Окрім цього має шифрований цифровий телеметрійний зв'язок дальнього радіусу дії, та можливість аналогової онлайн-трансляції відео для будь-якого типу корисного навантаження як додаткової опції.

Bayraktar TB2 турецький ударний оперативно-тактичний середньовисотний безпілотний літальний апарат (БПЛА) з великою тривалістю польоту, здатний виконувати дистанційно керовані або автономні польоти.



Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд Bayraktar TB2

Кожна систем Bayraktar TB2 складається з 6-ти літальних апаратів, двох наземних станцій керування, трьох наземних терміналів даних, двох дистанційних відеотерміналів обладнання наземної підтримки. Станції здатні перехоплювати керування безпілотниками одна одної, що дозволяє швидко змінювати тактику. Оперативний радіус дії дронів рахується не від точки старту, а від найближчої станції керування і контролю або від ретранслятора сигналів.



Рисунок 1.13 – Центр керування БПЛА в розрізі

Технічні характеристики:

- Оснащений двигуном внутрішнього згоряння;
- Тривалість польоту: 27 год;
- Максимальна швидкість: 222 км/год;
- Крейсерська: 130 км/год;
- Розмах крила: 12 м;
- Максимальна злітна маса: 650 кг;
- Вантажопідйомність: 150 кг (з них 55 кг оптико-електронна станція);
- Радіус зв'язку з центром керування: 150 км, оновлена версія 300 км;
- Озброєння: інтелектуальні боєприпаси МАМ: керовані уламково-фугасні та термобаричні; протитанкові ракети дальньої дії; лазерно керовані ракети, бомби (81 mm) [11].

1.5 Варіанти використання БПЛА

У зв'язку з ключовими особливостями, БПЛА розширюють свої можливості та знаходять все більше сфер застосування. На сьогоднішній день БПЛА почали активно використовуватись в різних галузях [12].

Сільське господарство давно використовує технологію дистанційного зондування землі для оцінки її стану і оцінки рослинності, яка дозволяє визначити поточну врожайність і планувати роботи для підвищення врожайності в майбутньому. Крім цього, безпілотні літальні апарати також використовуються для обприскування рослин та плодових дерев.

Використання БПЛА в електроенергетиці допомагають вирішувати різні завдання, наприклад: для аналізу лінійних об'єктів, виявлення пошкоджень інфраструктури, виявлення аварійних ситуацій та інших об'єктів в охоронній зоні лінії електропередач. Завдяки унікальним ультрафіолетовим датчикам, безпілотники можуть визначити місце коронного розряду на ЛЕП.

У нафтогазовій галузі безпілотні літальні апарати використовуються для різноманітних завдань, зокрема періодичних обльотів трубопровідних систем. Безпілотні літальні апарати з камерами і тепловізорами дозволяють швидко виявляти аварії, розливи нафтопродуктів, несанкціоновані врізки та займання торфовищ уздовж трубопроводів. Часто БПЛА використовуються для інспекції паливних сховищ та факельних труб під час планування та будівництва для екологічного моніторингу.

Геологи застосовують БПЛА для оцінки та збору інформації про місцевість яка є не доступною чи небезпечною для людини.

Охоронні агенції використовують дрони для моніторингу територій та відстеження рухомих об'єктів. Вони також супроводжують об'єкти на всьому їх шляху. Дрони часто використовуються для стеження за персоналом та оцінки рівня безпеки.

Військові та поліцейські організації використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА) для різних завдань. Це включає цілодобове патрулювання, доставку термінових вантажів у важкодоступні райони, охорону об'єктів та транспортних колон. Дрони також використовуються під час бойових дій, зокрема для здійснення розвідки.

Такі БПЛА в основному використовуються для проведення розвідки. Вони коригують вогонь артилерії, проводять аерофоторозвідку, отримують актуальні просторові дані, здійснюють радіоелектронну розвідку та забезпечують ретрансляцію для систем зв'язку. Для силових відомств важливо, щоб БПЛА були надійними та мають багатофункціональне обладнання. Вони також повинні бути добре захищеними від зовнішніх впливів та перехоплення управління та інформації.

У військових операціях часто використовуються і цивільні дрони з камерами, оскільки вони є ефективними для розвідки.

Безпілотники контролюють будівництво, виявляють помилки та надають інформацію для подальших робіт. Наявність камери забезпечує наявність чітких фотографій для аналізу ситуації. Важкі вантажні дрони можуть доставляти інструменти та будівельні матеріали.

Дрони є привабливими для використання в лісовому господарстві через їх компактність та маневреність. Вони можуть оцінювати умови території, визначати точки займання, вести облік диких тварин та цінних порід дерев. Швидкість яку може розвинути дрон, дозволяє виявляти браконьєрів та запобігати неправомірній вирубці лісу.

БПЛА надають надточні дані, необхідні для проектування доріг. Вони виконують аналіз дорожнього покриття, за допомогою зйомки з високою роздільною здатністю фіксують проблеми на дорогах. Ефективно контролюють виконання дорожніх робіт

Для створення топооснови проводиться аерофотозйомка високої роздільної здатності з точною координатною прив'язкою. На її основі створюються ортофотоплани та тривимірні моделі місцевості. Спеціалізовані дрони розраховані на встановлення корисного навантаження та обладнання, що дозволяє виконувати описані завдання.

Висновки до розділу 1

У розділі роботи було проведено дослідження та аналіз безпілотних літальних апаратів, включаючи класифікацію таких апаратів. Також були розглянуті основні вимоги до систем зв'язку, які є важливим компонентом для подальшого дослідження обраної теми та постановки завдань у наступних розділах. Крім цього, було проведено огляд сучасних безпілотних літальних апаратів з їхніми характеристиками та досліджено їх використання в різних галузях.

Після аналізу зібраної інформації та характеристик безпілотних літальних апаратів, для покращення можна використати широкосмуговий сигнал LoRa, це дозволить підвищити конфіденційність зв'язку з БПЛА. Цього можна досягти шляхом зменшення спектральної щільності сигналу передавача радіолінії що досліджувався у цьому розділі.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТЕХНОЛОГІЇ LoRa

2.1 Історія появи технології LoRa

Історія LoRa почалася в 2009 році, коли двоє друзів у Франції мали намір розробити технологію модуляції великої дальності та малої потужності. Незважаючи на опір, як і у випадку з більшістю революційних технологій, Ніколас Сорнін та Олів'є Селлер продовжували присвячувати свій час, щоб втілити цю ідею в реальність. У 2010 році Ніколя та Олів'є зустріли свого третього партнера, Франсуа Сфорца, і разом заснували компанію Cycleo . Спочатку троє засновників були націлені на індустрію вимірювальної техніки та мали на меті додати можливості бездротового зв'язку для лічильників газу, води та електроенергії. Для цього вони використовували технологію модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS) технологія, яка широко використовується для гідролокації в морській промисловості та радіолокації в авіації. Крім того, у тваринному світі ми бачимо цей фізичний феномен, який використовують дельфіни та кажани для виявлення риби чи комах. Насправді Cycleo не винайшли технологію CSS, скоріше вони ініціювали використання технології для надсилання даних.

Переконавшись у потужності даного винаходу на великій відстані та низькому споживанні, Semtech придбала Cycleo у травні 2012 року. Semtech співпрацювала з Ніколясом, Олів'є та Франсуа для подальшого вдосконалення технології та завершення розробки чіпів, необхідних для кінцевих пристроїв (SX1272 та SX1276) , а також як для шлюзів (SX1301). У той же час, створення власного протоколу MAC під назвою «LoRaMAC», серед іншого, визначило формати повідомлень і рівні безпеки для справжнього мережевого протоколу. У лютому 2015 року було засновано LoRa Alliance® , а мережевий протокол було перейменовано на LoRaWAN. Цілями Альянсу LoRa були і залишаються: підтримувати та сприяти глобальному прийняттю стандарту LoRaWAN шляхом забезпечення взаємодії всіх продуктів і технологій LoRaWAN [13].

2.2 Загальні відомості технології LoRa

LoRa розшифровується як Long Range Radio і в основному призначений для Інтернету речей (IoT) та мережі M2M. Це свого роду новий підхід бездротової модуляції, розроблений саме для з'єднання на великі відстані та зв'язку з низьким енергоспоживанням. Ця технологія дозволить мережам, що орендують багато користувачів, або загальнодоступним мережам підключати ряд програм, що працюють в одній мережі.

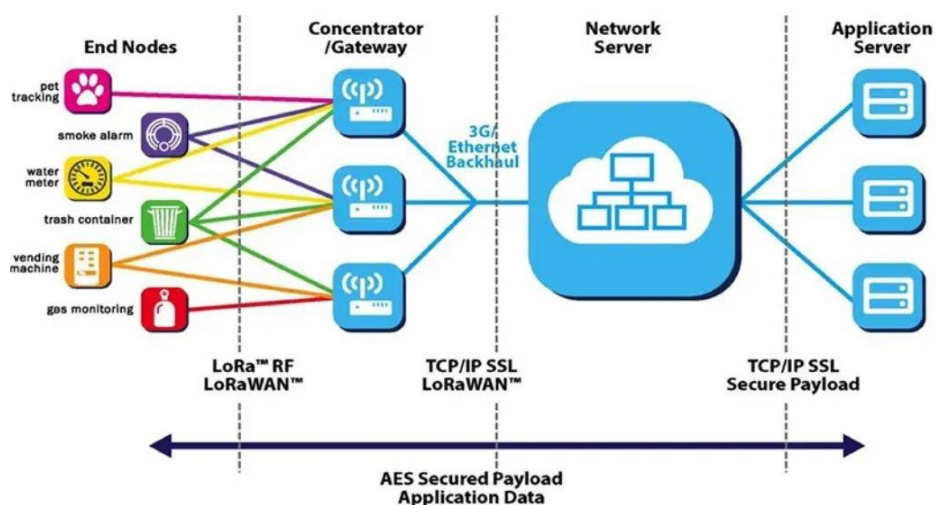


Рисунок 2.1 – Мережева архітектура LoRa

Протокол LoRa включає низку різних рівнів, включаючи прикладну програму та рівень пристрою для безпечного зв'язку, шифрування в мережі. Кожен окремий шлюз LoRa має можливість обробляти до мільйонів вузлів. Сигнали можуть поширюватися на значну відстань, що означає, що потрібно менше структури, зробити побудову мережі швидшою та набагато дешевшою у реалізації.

Основні особливості та переваги радіотехнології LoRa:

- З'єднання на великі відстані – діапазони включення 15+ км у сільській місцевості та 5+ км в міських районах. Дозволяє охоплювати масштаб міста.
- Низька потужність – чіпи LoRa потягують потужність, дозволяє датчикам працювати 5-10+ років на батарейках. Значно знижує витрати на обслуговування.

- Безпечні передачі – 128-бітове шифрування AES захищає дані та запобігає підробці.
- Точна геолокація – сигнали можуть визначити місцезнаходження з точністю до десятків метрів без GPS. Корисно для відстеження активів.
- Смути глобального спектру – LoRa працює в безліцензійних діапазонах ISM, як 433, 868, і 915 МГц. Забезпечує сумісність у всьому світі.
- Двонаправлений зв'язок – надішліть дані вгору та натисніть конфігурацію вниз. Комунікаційні пристрої LoRa підтримують дистанційне керування.
- Висока місткість – один шлюз LoRa може обробляти мільйони повідомлень щодня з тисяч пристроїв.
- Відкритий стандарт – LoRaWAN – це відкрита специфікація, яку контролює некомерційний LoRa Alliance. Стимулює впровадження та взаємодію [14].

Різні компоненти технології LoRa сприяють загальному з'єднанню та функціональності. LoRa Alliance створив відкритий стек протоколів LoRa, що дало змогу реалізувати концепцію LoRa уникнувши певних труднощів, оскільки компанії з різних сфер діяльності, які беруть участь у розробці, впровадженні і використанні LoRa, змогли об'єднатися, щоб створити доступне та просте у використанні рішення для підключення будь-яких пристроїв Інтернету речей.

Окрім радіочастотних компонентів бездротової системи LoRa, існують додаткові елементи мережевої архітектури, такі як загальна структура системи, сервер, зворотний зв'язок і прикладні комп'ютери, тощо. Загальну архітектуру часто називають LoRaWAN.

Фізичний рівень LoRa (PHY) є основою для роботи систем, він визначає параметри радіочастотного сигналу, який пересилається між вузлами або кінцевими точками. Фізичний рівень керує такими аспектами сигналу, як метод

модуляції, рівні потужності, частоти, сигналізація між передавачем і приймачем, а також інші пов'язані параметри.

2.3 Принципи та характеристики модуляції технології LoRa

Як вже було зазначено раніше, LoRa використовує розширену спектральну модуляцію, для розширення вузько смугового сигналу на широку смугу каналу.

Запатентована техніка модуляції з розширеним спектром, отримана від існуючої технології Chirp Spread Spectrum (CSS), LoRa пропонує компроміс між чутливістю та швидкістю передачі даних, працюючи в каналі з фіксованою смугою пропускання 125 або 500 кГц (для каналів висхідної лінії зв'язку), і 500 кГц (для каналів низхідної лінії). 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 окремого кінцевого вузла. Наприклад, кінцевий пристрій, розташований поблизу шлюзу, має передавати дані з низьким коефіцієнтом розповсюдження, оскільки потрібен дуже малий бюджет зв'язку. Однак кінцевий пристрій, розташований за кілька миль від шлюзу, повинен буде передавати з набагато вищим коефіцієнтом поширення. Цей вищий коефіцієнт поширення забезпечує підвищений приріст обробки,

LoRa – це суто фізична (PHY) або «бітова» реалізація рівня, як визначено семирівневою мережевою моделлю OSI, зображеною на рис. 2.2. Замість кабелю, повітря використовується як середовище для транспортування радіохвиль LoRa від Радіочастотний передавач у пристрої IoT до радіочастотного приймача в шлюзі та навпаки.

У мережі LoRaWAN немає зв'язку «один-до-одного» між пристроями на основі LoRa та шлюзами; повідомлення, надіслані на кінцеві пристрої та з них, проходять через усі шлюзи в межах досяжності. Дедуплікацію обробляє мережевий сервер. У традиційній системі або системі з розширеним спектром прямої послідовності (DSSS) фаза несучої сигналу передавача змінюється відповідно до кодової послідовності, як показано на рис.2.3.

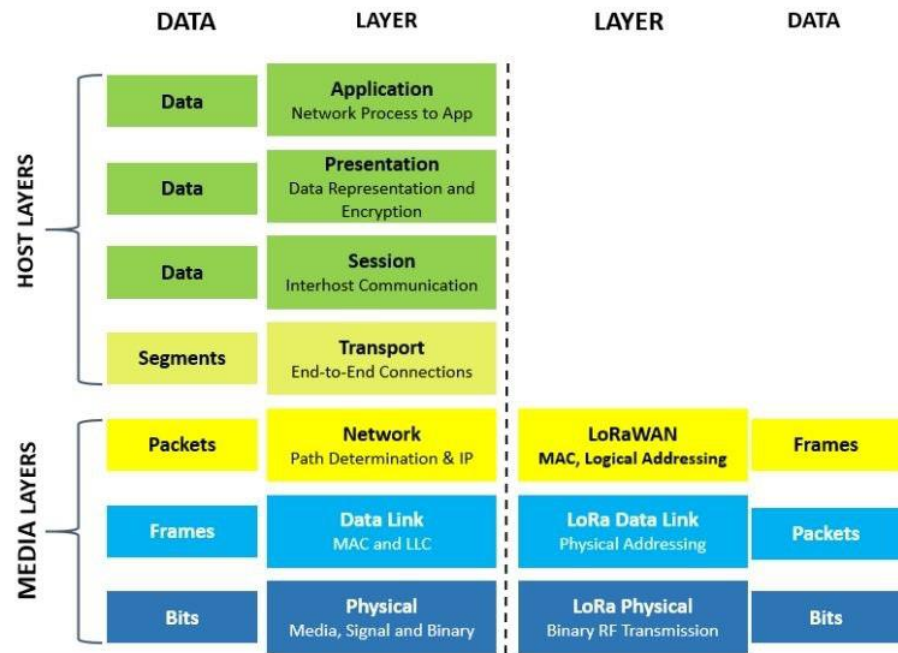


Рисунок 2.2 – Семирівнева модель мережі OSI

При множенні сигналу даних на попередньо визначену бітову схему зі значно вищою швидкістю, також відомий як код розширення (або послідовність мікросхем), створюється «швидший» сигнал, який має більш високі частотні компоненти, ніж вихідний сигнал даних. Це означає, що смуга пропускання сигналу розповсюджується за межі смуги вихідного сигналу. У радіочастотній термінології біти кодової послідовності називаються чипами (щоб відрізнити довші незакодовані біти вихідного сигналу даних). Коли переданий сигнал надходить на радіочастотний приймач, він множиться на ідентичну копію коду розповсюдження, який використовується в радіочастотному передавачі, у результаті чого створюється копія вихідного сигналу даних.

Виконання цього множення кодової послідовності дає більший бюджет радіочастотного зв'язку, як результат, можливість передавати на більшій відстані.

Співвідношення Log_{10} швидкості чіпів кодової послідовності та швидкості бітів сигналу даних називається коефіцієнтом підсилення обробки (G_p). Це посилення дозволяє приймачу відновити вихідний сигнал даних, навіть якщо канал має негативне відношення сигнал/шум (SNR). LoRa має кращий G_p порівняно з модуляцією частотної маніпуляції (FSK), що дозволяє знизити рівень

вихідної потужності передавача, зберігаючи ту саму швидкість передачі сигналу та аналогічний бюджет зв'язку.

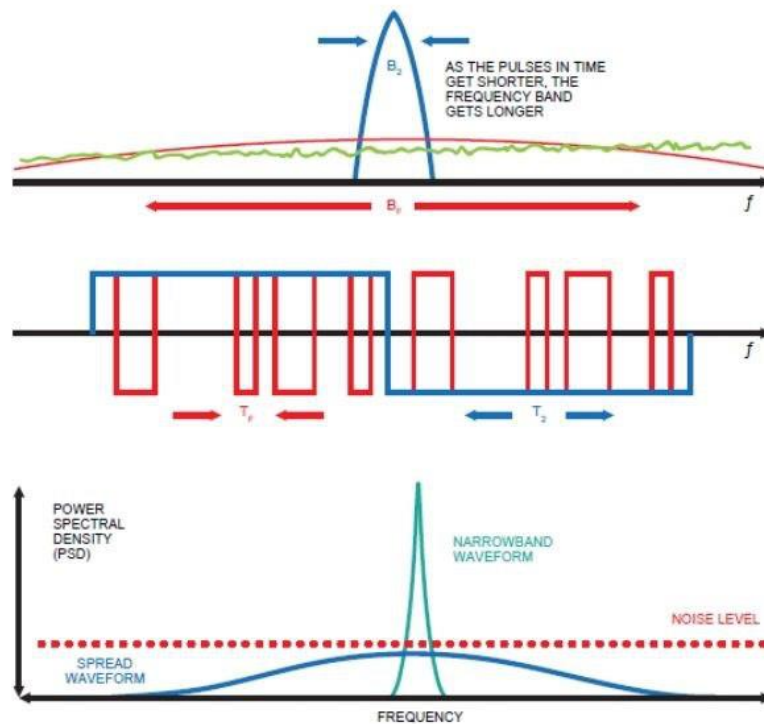


Рисунок 2.3 – Зміни сигналу передавача несучої фази системи DSSS

Одним із недоліків системи DSSS є те, що для неї потрібен високоточний (і дорогий) опорний годинник. Технологія LoRa Chirp Spread Spectrum (CSS) від Semtech пропонує недорогу та малопотужну, але надійну альтернативу DSSS, яка не потребує високоточного еталонного годинника. У модуляції LoRa розширення спектру сигналу досягається шляхом генерації чірп-сигналу, частота якого постійно змінюється, як показано на рис.2.4 .

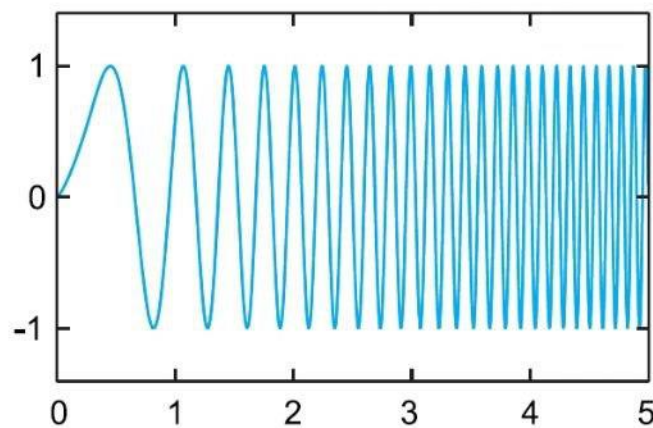


Рисунок 2.4 – Приклад розширеного спектру чірпу LoRa

Перевагою цього методу є те, що часові та частотні зміщення між передавачем і приймачем еквівалентні, що значно зменшує складність конструкції приймача. Смуга пропускання частот цього чирпу еквівалентна ширині спектральної смуги сигналу. Сигнал даних, який передає дані від кінцевого пристрою до шлюзу, чіплюється з вищою швидкістю передачі даних і модулюється на сигнал несучої частотної модуляції. Модуляція LoRa також включає змінну схему корекції помилок, яка покращує надійність переданого сигналу. На кожні чотири надіслані біти інформації надсилається п'ятий біт інформації про парність [15].

Адаптивна швидкість передачі даних (Adaptive Bitrate Streaming – ABR) – це метод LoRa для динамічної оптимізації швидкості передачі даних між пристроями кінцевих вузлів і шлюзами. Використання ABR, вузли можуть переходити на більш високі швидкості передачі даних, коли перешкоди низькі, і переходити на більш надійні швидкості передачі даних, коли перешкоди збільшуються.

Ця оптимізація забезпечує найкращу швидкість передачі даних за мінливих умов каналу, максимізація часу автономної роботи вузлів і загальної ємності мережі.

Разом CSS і ABR дають LoRa вражаючий діапазон і стійкість при мінімальному споживанні енергії. Для інших систем сигнали виглядають як шум, посилення безпеки [14].

Як зазначено вище, посилення обробки LoRa вводиться в радіочастотний канал шляхом множення сигналу даних на код розширення або послідовність мікросхем. Збільшуючи швидкість чіпа, ми збільшуємо частотні компоненти загального спектру сигналу. Іншими словами, енергія загального сигналу тепер поширюється на ширший діапазон частот, що дозволяє приймачу розрізняти сигнал із нижчим (тобто гіршим) відношенням сигнал/шум (SNR).

У термінах LoRa кількість коду розширення, застосованого до вихідного сигналу даних, називається коефіцієнтом розширення (SF). Модуляція LoRa має загалом шість коефіцієнтів поширення (SF7–SF12). Чим більший використовується коефіцієнт розповсюдження, тим далі сигнал зможе

поширюватися і все одно прийматиметься радіочастотним приймачем без помилок.

У таблиці 2.1 показано чотири різні коефіцієнти розширення [SF7...SF10], які можна використовувати для повідомлень висхідної лінії зв'язку (UL) на каналі 125 кГц. Він показує еквівалентну швидкість передачі даних, а також приблизну дальність (це залежить від рельєфу; у сільській місцевості можна досягти більшої відстані, ніж у місті). Він також показує значення часу перебування або часу в ефірі (TOA) для 11-байтового корисного навантаження для кожного з чотирьох коефіцієнтів поширення.

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

Таблиця 2.1 – Фактори поширення LoRa

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Важливо, що коефіцієнти поширення модуляції LoRa за своєю суттю ортогональні. Це означає, що сигнали, модульовані з різними коефіцієнтами розширення та передані на одному частотному каналі одночасно, не створюють перешкод один одному. Натомість сигнали з різними коефіцієнтами розповсюдження просто виглядають шумом один для одного.

Сигнали LoRa надійні та дуже стійкі до внутрішньосмугових і позасмугових механізмів перешкод. Модуляція LoRa також забезпечує стійкість до багатопроменевого поширення та завмирання, що робить її ідеальною для використання в міських і приміських середовищах, де домінують обидва механізми. Крім того, доплерівські зсуви викликають невеликий зсув частоти на часовій осі основного сигналу. Цей допуск зміщення частоти пом'якшує вимоги

до опорних джерел синхронізації з жорстким допуском ϵ , отже, робить LoRa ідеальним для передачі даних із мобільних пристроїв [15].

Характеристики модуляції LoRa для кожного регіону визначені в документі LoRaWAN Regional Parameters, доступному в LoRa Alliance®. У Північній Америці визначено 64 канали висхідної лінії зв'язку LoRa 125 кГц, зосереджені на растрі 200 кГц, як показано на рис. 1.5. Існує вісім каналів висхідної лінії зв'язку 500 кГц, а також визначено вісім каналів низхідної лінії зв'язку 500 кГц. У Північній Америці шлюзи можуть мати до 64 каналів висхідної лінії зв'язку 125 кГц, а також вісім каналів висхідної та низхідної лінії зв'язку 500 кГц. Цей тип шлюзу називається макрошлюзом операторського рівня та використовується лише для зовнішнього застосування.

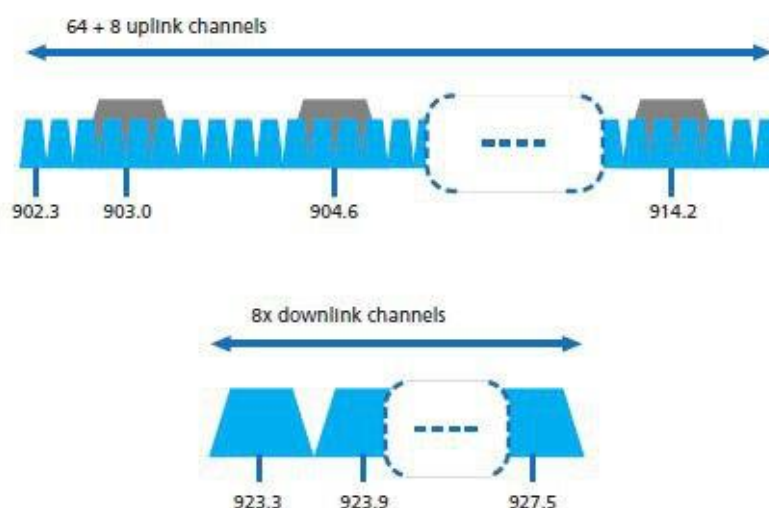


Рисунок 2.5 – Характеристики модуляції LoRa

Таблиця 2.2 надає інший спосіб зрозуміти ці характеристики модуляції[15]. Фізичний рівень LoRa рекомендований для додатків, що мають низьку пропускну здатність, повільну передачу даних і великий бюджет зв'язку, тобто для додатків, які потребують "далекого" зв'язку. Для фіксованої пропускну здатності каналу, підвищення коефіцієнта розширення призводить до збільшення обробки, що в свою чергу збільшує чутливість ϵ , отже, збільшує бюджет зв'язку. Проте, збільшення часу в ефірі відбувається згодом. Окрім цього однією з переваг ортогональності між коефіцієнтами розширення є можливість передавати кілька

сигналів LoRa одночасно у межах однієї частоти каналу та одного часового інтервалу.

Таблиця 2.2 – Характеристика модуляції LoRa

Data Rate (DR)	Spreading Factor (SF)	Channel Frequency	Uplink or Downlink	Bitrate (Bits/Sec)	Maximum User Payload Size (Bytes)
0	SF10	125 kHz	Uplink	980	11
1	SF9	125 kHz	Uplink	1,760	53
2	SF8	125 kHz	Uplink	3,125	125
3	SF7	125 kHz	Uplink	5,470	242
4	SF8	500 kHz	Uplink	12,500	242
5 – 7					
8	SF12	500 kHz	Downlink	980	53
9	SF11	500 kHz	Downlink	1,760	129
10	SF10	500 kHz	Downlink	3,125	242
11	SF9	500 kHz	Downlink	5,470	242
12	SF8	500 kHz	Downlink	12,500	242
13	SF8	500 kHz	Downlink	21,900	242

За допомогою вузької смуги частот для фіксованого SF можна підвищити чутливість, оскільки швидкість передачі даних буде менша. У Північній Америці LoRaWAN використовує висхідні канали з шириною 125 кГц та 500 кГц для висхідних та низхідних каналів відповідно. Швидкість кодування визначається як рівень надлишковості, що застосовується через пряме виправлення помилок (FEC), з метою виявлення та коригування помилок. Наприклад, для протоколу LoRaWAN ця швидкість зафіксована на рівні 4/5.

2.4 Безпека мережі та швидкість передачі даних технології LoRa

Для того, щоб будь-яка комунікаційна технологія з багатьма підключеними вузлами була надійно захищеною, потрібна ефективна багатошарова система безпеки. У випадку з технологією LoRa, це досягається шляхом застосування двох рівнів захисту: перший для мережі, другий - для програмного забезпечення. Безпеку мережі забезпечує перевірка достовірності підключених вузлів до мережі, безпека програмного забезпечення гарантує, що оператори не матимуть доступу до даних, що передаються між вузлами. Одним з інструментів, які

використовуються у технології LoRa для забезпечення безпеки, є шифрування за допомогою ключів безпеки AES (Advanced Encryption Standard).

Для досягнення необхідного рівня безпеки для мереж LoRa було застосовано кілька рівнів шифрування:

- Унікальний мережевий ключ (EUI64) і забезпечення безпеки на рівні мережі.
- Унікальний ключ програми (EUI64) забезпечує наскрізну безпеку на рівні програми.
- Спеціальний ключ для пристрою (EUI128) [16].

У додаток до зміни частоти, всі пакети зв'язку між пристроями та шлюзами також включають параметр "Швидкість передачі даних" (Data Rate). Вибір цієї швидкості дозволяє знайти компроміс між дальністю передачі та швидкістю обміну повідомленнями. Крім цього, завдяки технології розширеного спектру, комунікація між пристроями з різними швидкостями передачі даних не заважає одна одній і створює набір віртуальних "кодових" каналів, що підвищують пропускну здатність шлюзу, щоб максимально продовжити час автономної роботи кінцевих пристроїв і загальну пропускну здатність мережі, мережевий сервер LoRaWAN налаштовує швидкість передачі даних та потужність радіосигналу для кожного пристрою окремо, використовуючи адаптивну схему.

Швидкість передачі даних в режимі LoRaWAN коливається від 0,3 кбіт / с до 50 Кбіт / с (в режимі FSK) [17].

2.5 Технічні особливості технології LoRa

LoRa використовує модуляцію CSS (Chirp Spread Spectrum), яка використовує метод розширення частоти як техніку модуляції. Так звані чирп-імпульси надсилаються як символи, які з часом постійно збільшують або зменшують частоту LoRa. Потім передача даних здійснюється за допомогою послідовної послідовності цих імпульсів ЛЧМ.

Lora-based Frequency		MOKOSMART
Region	The Lora-based Frequency	
Europe	863-870 MHz	
	433 MHz	
US	902-928 MHz	
China	470-510 MHz	
	779-787 MHz	
Australian	915-928 MHz	
Indian	865-867 MHz	
Asia	433 MHz	
North America	915 MHz	

Рисунок 2.6 – Значення частот для технології LoRa в залежності від регіону

Оскільки LoRa працює в діапазонах частот ISM (433 МГц, 868 МГц і 915 МГц), випромінювана потужність передачі обмежена. Щоб мати більший радіус дії, ніж звичайні типи модуляції, такі як FSK (Frequency Shift Keying), чутливість приймача була значно покращена за допомогою LoRa. Приймач LoRa все ще може успішно приймати та декодувати корисний сигнал LoRa до 20 дБ нижче рівня шуму, що призводить до максимальної чутливості приймача до -149 дБм. Порівняно з максимальною чутливістю FSK прибіл. від -125 дБм до -130 дБм, LoRa пропонує значне покращення.

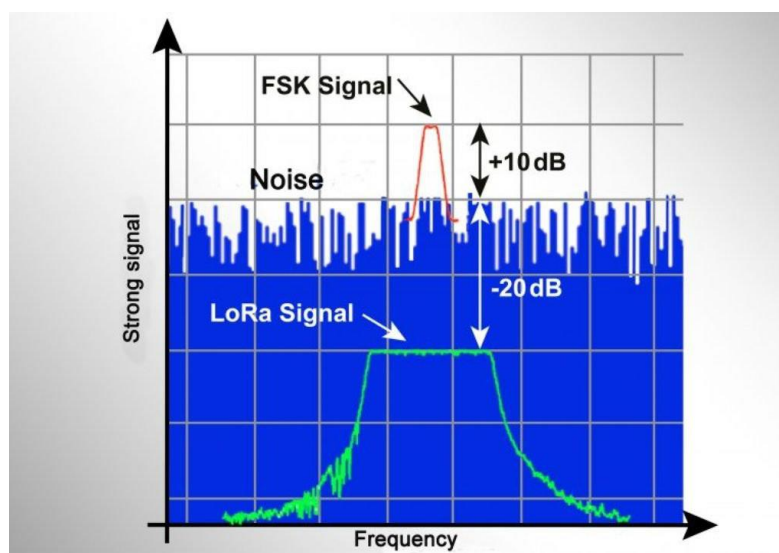


Рисунок 2.7 – Графік сигналу LoRa

Завдяки тому, що LoRa може успішно приймати корисний сигнал до 20 дБ нижче рівня шуму, стійкість до радіоперешкод значно краща, ніж у FSK. Системи

FSK працюють правильно, лише якщо сигнал перешкоди принаймні на 10 дБ слабший за корисний сигнал. У найкращому випадку системи LoRa можуть приймати корисний сигнал, якщо сигнал перешкод на 20 дБ сильніший за корисний сигнал.

З рис. 2.7 вище можна бачити, що LoRa може приймати приблизно на 30 дБ слабші сигнали, ніж FSK. Однак є два обмеження, які дещо релятивують цю велику різницю.

- По-перше, модуляція LoRa є широкосмуговою, ніж модуляція FSK, що означає, що рівень шуму приймача LoRa зазвичай вищий, ніж у приймача FSK. Зокрема, подвоєння смуги пропускання збільшує рівень шуму на 3 дБ.

- По-друге, LoRa може отримувати корисний сигнал лише на 20 дБ нижче рівня шуму при дуже низькій швидкості передачі даних $\leq 0,5$ кбіт/с. Як тільки швидкість передачі даних збільшується, або негативне відношення сигнал/шум зростає ще більше до нуля, або смуга пропускання повинна бути збільшена далі, що, у свою чергу, збільшує рівень шуму [18].

Висновки до розділу 2

В данному розділі було проведено огляд основ технології LoRa. Розглянуто принципи та характеристики модуляції, дані про безпеку та швидкість передачі даних що підтримуються технологією. Була надана інформація про архітектуру мережі та технічні відомості що будуть використані в наступних розділах для розрахунків.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ДАЛЬНОСТІ РАДІОЛІНІЇ

3.1 Методика розрахунку дальності передавання команд керування БПЛА з використанням технології LoRa

Відповідно до мети досліджень необхідно розробити методику розрахунку дальності зв'язку з БПЛА із застосуванням технології LoRa (табл.3.1) та визначення взаємозв'язку між дальністю дії радіолінії та інформаційною швидкістю.

Знайти дальність зв'язку R^2 від передавача потужністю P_B до приймача з чутливістю P_C , при умові, що в радіолінії використовуються радіохвилі довжиною λ , можна з формули:

$$R^2 = \frac{P_B \cdot G_B \cdot G_n \cdot \gamma \cdot \lambda^2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{(4\pi)^2 \cdot P_C}, \quad (3.1)$$

де γ – множник послаблення сигналу при розповсюдженні від передавача до приймача;

η_1, η_2 – ККД антенно - фідерного передавального та приймального трактів.

G_B, G_n – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен.

Множник послаблення сигналу при розповсюдженні вздовж поверхні можна визначити за виразом:

$$\gamma = \frac{4\pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot R}, \quad (3.2)$$

де h_1, h_2 – висота передавальної та приймальної антен [19].

З виразів (3.1) та (3.2), отримуємо формулу яку і використаємо для знаходження дальності зв'язку:

$$R = \sqrt[3]{\frac{P_B \cdot G_B \cdot G_n \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot \lambda \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{4\pi \cdot P_C}}, \quad (3.3)$$

При зміні фактору розширення спектра SF змінюється чутливість приймача для різних значень ширини спектра радіосигналу, яку можна визначити за даними табл.3.2.

Таблиця 3.1 – Стандарти LoRa

Параметр	Євр опа	Північна Америка
Частотний діапазон (Band 1), МГц	863 – 870	902 - 928
Ширина спектру радіосигнала, кГц	125/ 250	125/500
Модуляція	LORA, GFSK, MSK	
Потужність передачі, мВт	1-25	1-630
Фактор розширення спектру SF	7-12	7-10

Таблиця 3.2 – Залежність чутливості приймача від фактору розширення спектра

Description	Spreading Factor	RF sensitivity, dBm
RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 125 kHz bandwidth	SF = 6	-118
	SF = 7	-123
	SF = 8	-126
	SF = 9	-129
	SF = 10	-132
	SF = 11	-133
	SF = 12	-136
RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 250 kHz bandwidth	SF = 6	-115
	SF = 7	-120
	SF = 8	-123
	SF = 9	-125
	SF = 10	-128
	SF = 11	-130
	SF = 12	-133
RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 500 kHz bandwidth	SF = 6	-111
	SF = 7	-116
	SF = 8	-119
	SF = 9	-122
	SF = 10	-125
	SF = 11	-128
	SF = 12	-130

Швидкість передачі інформації, яка забезпечується при різних значеннях SF та BW і відповідає різним швидкостям циклічного кодування CR визначимо згідно виразу:

$$Rb = SF \cdot BW / 2^{SF} \cdot CR. \quad (3.4)$$

3.2 Розрахунок дальності передавання команд керування БПЛА з використанням технології LoRa

Вихідні дані для розрахунку:

- Частотний діапазон 863 – 870 МГц,
- ширина спектру радіосигналу -125 кГц,
- рівень потужності передавача наземного терміналу - 2-14 дБм,
- фактор розширення спектру - 6,...,12.

Розрахунки дальності дії радіолінії проводимо згідно для визначених параметрів LoRa (табл.3.1) та відношення чутливості приймача до фактору розширення спектру (табл.3.2). Антени неспрямовані з коефіцієнтом підсилення $G_e = G_n = 1,64$ та коефіцієнтом корисної дії $\eta_1 = \eta_2 = 0,9$, що розташовуються на висоті $h_1=2\text{м}$ – передавальна. Приймальна антена встановлена на БПЛА, тому висота змінна в межах значень, що визначені у розділі 1 для відповідних типів БПЛА, що аналізуються у роботі.

Розраховуємо за початковими вхідними даними дальність дії радіолінії за формулою (3.3), по черговому змінюючи параметр потужності передавача P_e в межах від 1 до 25 мВт для чутливості приймача (P_c) -123 дБм з фактором розширення $SF=7$, для зручності значення дБм переводиться в $5,01 \cdot 10^{-13}$ мВт. При цьому пропускна здатність (BW) смуги 125 кГц. Висота приймальної антени становить 20 м. З отриманих результатів будуюмо графік-рис.3.1. Як бачимо з рис.3.1, при збільшенні потужності передавача (P_e) буде лінійно збільшуватись значення дальності радіолінії. Якщо при мінімальному обраному значенні потужності передавача, що надалі буде розглядатись як початкове 5 мВт довжина радіолінії була 29 км, то зі збільшенням потужності до максимально можливого значення 25мВт, отримаємо дальність до 49 км.

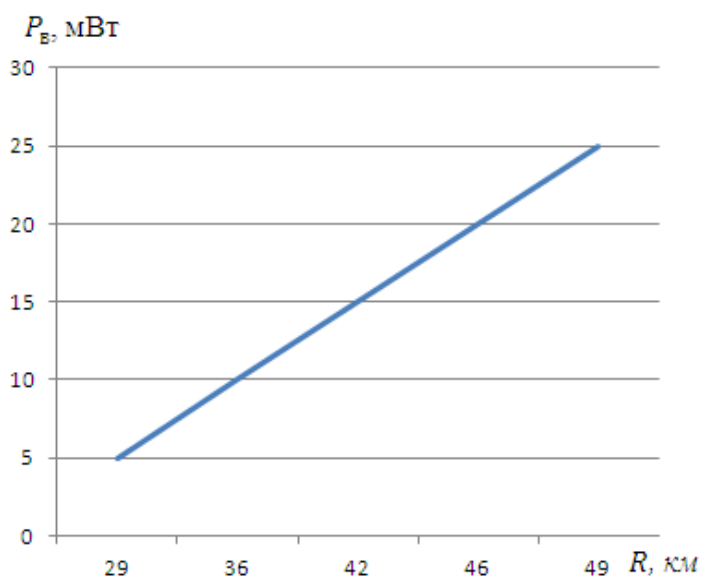


Рисунок 3.1 – Графік залежності дальності дії радіолінії (R) від потужності передавача (P_e)

Далі дослідимо дальність дії радіолінії згідно формули (3.3), при зміні параметру висоти приймальної антени h_2 в межах від 2м до 1 км, при сталих значеннях, параметру потужності передавача $P_e = 5$ мВт для чутливості приймача (P_c) -123 дБм з фактором розширення $SF=7$, з пропускнуою здатністю (BW) смуги 125 кГц. З отриманих результатів будуюмо графік –рис.3.2. При збільшенні висоти приймальної антени (h_2) дальність радіолінії буде зростати (рис.3.2) з аналогічними значеннями радіолінії як і на графіку залежності дальності дії радіолінії (R) від потужності передавача (P_e) (рис.3.1). Фактично при мінімальному початковому обраному значенні висоти антени 20 м дальність радіолінії буде становити 29 км, при збільшенні висоти антени до 100 м отримаємо радіолінію дією 49 км.

Дослідимо як зміна параметру фактору розширення спектру SF від 7 до 12 з пропускнуою здатністю (BW) смуги 125 кГц (з табл. 3.2) значення чутливості приймача (P_c) ми беремо з колонки *RF sensitivity, dBm* та переводимо обрані значення в мВт, визначаємо як це вплине на дальність дії радіолінії згідно формули (3.3).

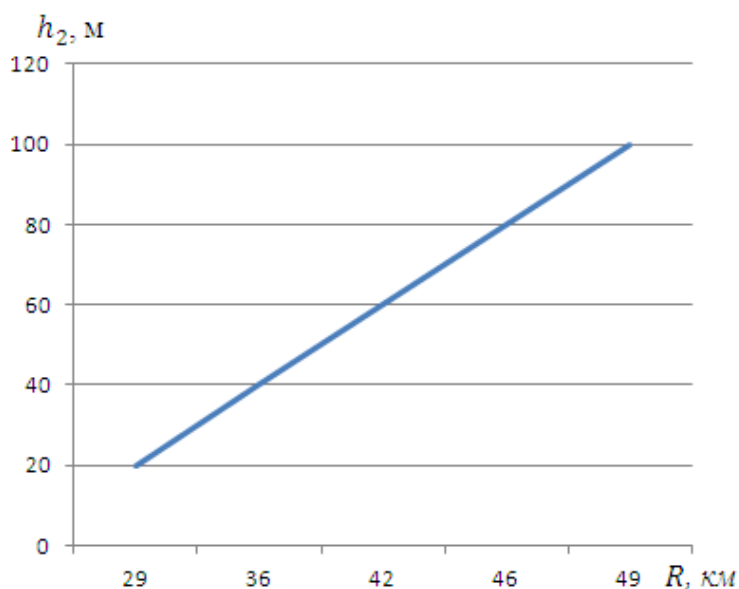


Рисунок 3.2 – Графік залежності дальності дії радіолінії (R) від висоти приймальної антен (h_2)

Зі сталими значеннями, параметру потужності передавача $P_g = 5$ мВт, висота приймальної антени $h_2 = 20$ м. З отриманих результатів будуюмо графік-рис.3.3.

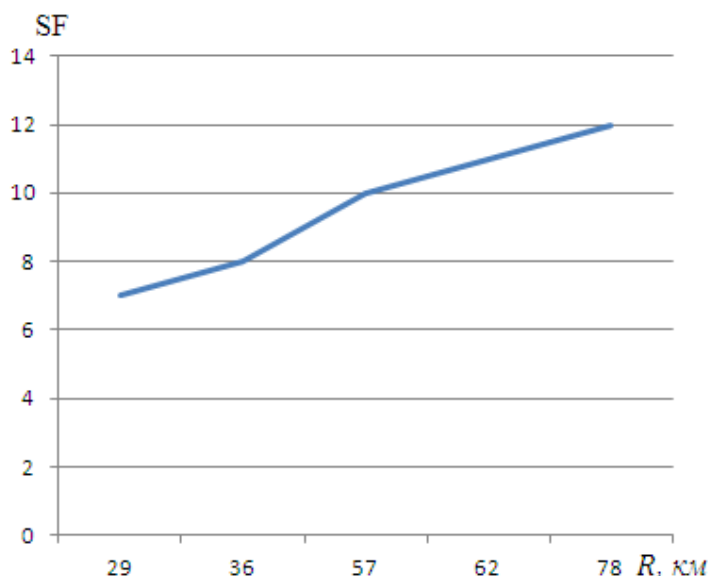


Рисунок 3.3 – Графік залежності дальності дії радіолінії (R) від фактору розширення спекту SF при розмірі смуги пропускання каналу 125 кГц

При зміні параметру фактору розширення спекту SF в більшу сторону, і зміні значення чутливості приймача (P_c), знову ж спостерігаємо тенденцію збільшення дальності радіолінії. При мінімально початковому значенні фактору $SF=7$ і сталих значеннях потужності передавача і приймальної антени, дальність радіолінії становить 29 км, з поступовим збільшенням фактору до максимального значення $SF=12$ дальність радіолінії зростає до 78 км.

Далі змінюємо розмір смуги пропускання каналу на 250 кГц, щоб дослідити як пропускна здатність вплине на дальність радіолінії.

Використовуючи формули (3.3) знову змінюємо параметр потужності передавача P_g в межах від 1 до 25 мВт для чутливості приймача (P_c) -120 дБм з фактором розширення $SF=7$, значення дБм переводиться в $10 \cdot 10^{-13}$ мВт. Пропускна здатність (BW) смуги 250 кГц. Висота приймальної антени становить 20 м. З отриманих результатів будуюмо графік –рис. 3.4.

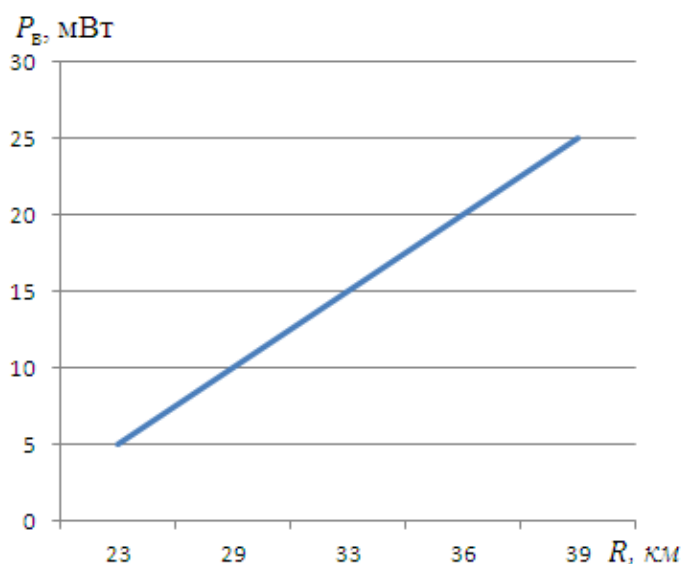


Рисунок 3.4 – Графік залежності дальності дії радіолінії (R) від потужності передавача (P_g) при розмірі смуги пропускання каналу 250 кГц

З рис.3.4, при збільшенні потужності передавача (P_g) значення дальності радіолінії буде збільшуватись. При мінімальному обраному значенні потужності передавача, що надалі буде розглядатись як початкове 5 мВт довжина радіолінії була 23 км, то при збільшенні потужності до максимально можливого значення 25мВт, отримаємо дальність до 39 км.

Дослідимо як дальність дії радіолінії згідно формули (3.3), буде змінюватись при параметрі висоти приймальної антени h_2 в межах від 2м до 1 км, зі сталими значеннями, параметру потужності передавача $P_g = 5$ мВт для чутливості приймача (P_c) -120 дБм з фактором розширення $SF=7$, з пропускнуою здатністю (BW) смуги 250 кГц. З отриманих результатів будуємо графік залежності –рис.3.5.

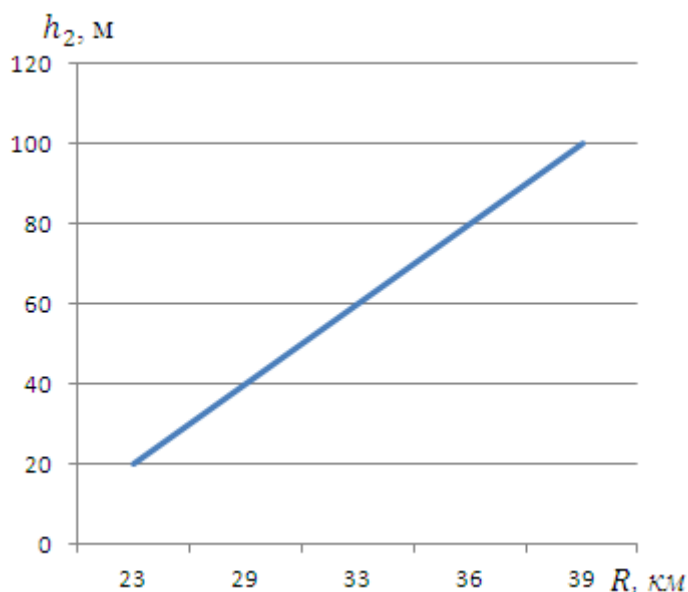


Рисунок 3.5 – Графік залежності дальності дії радіолінії (R) від висоти приймальної антени (h_2) при розмірі смуги пропускання каналу 250 кГц

При збільшенні висоти приймальної антени (h_2) дальність радіолінії буде зростати (рис.3.5) знову до аналогічних значень радіолінії як і на графіку залежності дальності дії радіолінії (R) від потужності передавача (P_e) (рис.3.4). При мінімальному початковому обраному значенні висоти антени 20 м дальність радіолінії буде становити 23 км, при збільшенні висоти антени до 100 м отримаємо радіолінію дією 39 км.

При зміні параметру фактору розширення спекту SF від 7 до 12 з пропускною здатністю (BW) смуги 250 кГц (з табл. 3.2) значення чутливості приймача (P_c). Зі сталими значеннями, параметру потужності передавача $P_e = 5$ мВт, висота приймальної антени $h_2 = 20$ м. З отриманих результатів будемо графік –рис. 3.6.

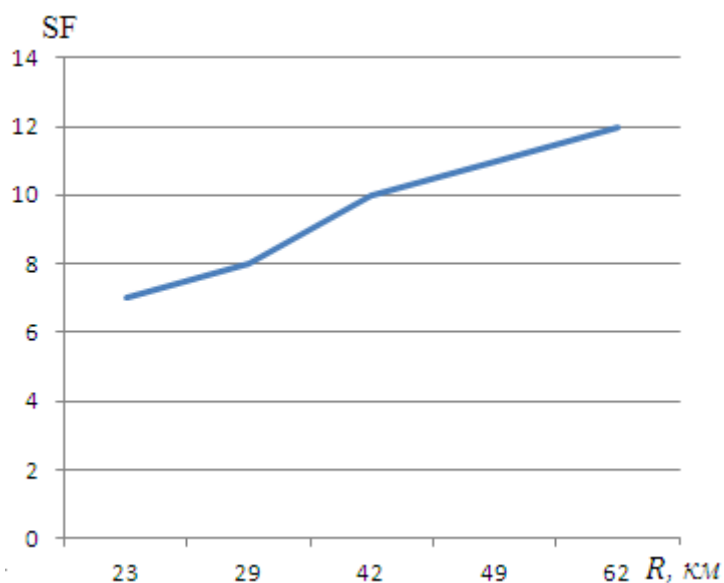


Рисунок 3.6 – Графік залежності дальності дії радіолінії (R) від фактору розширення спекту SF при розмірі смуги пропускання каналу 250 кГц

При зміні параметру фактору розширення спекту SF в більшу сторону, традиційно значення чутливості приймача (P_c), отримаємо збільшення дальності радіолінії. При мінімально початковому значенні фактору $SF=7$ і сталих значеннях пожуності передавача і приймальної антени, дальність радіолінії становить 23 км, зі збільшенням цього фактору до максимального значення $SF=12$ дальність радіолінії зросте до 62 км.

3.3 Аналіз отриманих результатів

З отриманих даних про залежність дальності дії радіолінії (R) від потужності передавача (P_e) рис.3.1 та рис.3.4 можемо зробити висновок, що зі збільшенням потужності передавача у технології LoRa, дозволяє збільшити дальність радіолінії. Збільшення потужності передавача дозволяє значно збільшити потужність сигналу радіолінії, це дозволить зовнішнім приймачам що знаходяться на більшій відстані від передавача отримувати та декодувати сигнал в кращому вигляді, однак збільшення потужності передавача може збільшити шум та перешкоди. Тому, при збільшенні потужності передавача необхідно забезпечити баланс між дальністю передачі та якістю.

З графіків (рис. 3.2 та рис.3.5) залежності дальності дії радіолінії (R) від висоти приймальної антен (h_2) спостерігаємо наступне, що зі збільшенням висоти приймальної антени – дальність дії радіолінії буде зростати. Збільшення висоти антени позитивно впливає на дальність радіолінії, це пояснюється тим, що чим вище розташована антена тим кращу лінію прямої видимості вона матиме з передавачем. Окрім цього, це дозволить зменшити перешкоди на шляху сигналу та покращити дальність його передачі.

Аналізуючи графіки (рис.3.3 та рис.3.6) від значення смуги пропускання каналу, бачимо наступне, при початковому розмірі смуги пропускання каналу 125 кГц дальність дії при максимальному значення фактору розширення спектру (SF) буде більшою на 16 км, ніж при смузі пропускання каналу 250 кГц. Окрім цього, збільшення фактору розширення спектру SF теж забезпечує збільшення довжини радіолінії.

3.4 Дослідження інформаційної швидкості радіолінії

Фізичний радіоінтерфейс LoRa заснований на використанні широкосмугових радіосигналів з базою, яка багато більша за одиницю, що обумовлює його високу стійкість перед перешкодами. Під час передавання цифрових даних відбувається адаптивна зміна бази радіосигналу з метою забезпечення необхідної якості зв'язку. Це досягається за рахунок зміни тривалості символу даних, що залежить від коефіцієнту розширення спектру радіосигналу SF , який фактично визначає розрядність символу даних, що передається за час символу [20]. Швидкість передачі інформації, згідно виразу (3.4), залежить від коефіцієнта розширення спектру SF та ширини спектру сигналу BW і змінюється при зміні швидкості циклічного кодування CR .

Прооведемо розрахунок швидкості передачі інформації по радіолінії, згідно виразу (3.4), для мінімального значення ширини спектру сигналу $BW=125$ кГц. З наведених у табл. 3.3 даних передусь, що швидкість передавання даних по радіолінії можливо адаптивно змінювати в залежності від умов, які створюються

під час передавання команд управління. При цьому, завжди може бути забезпечена необхідна для керування БПЛА швидкість передавання даних.

Таблиця 3.3.- Швидкість передачі інформації R_b , біт/с

SF	7	8	9	10	11	12
CR =1	6	3	2	1	67	36
	835,94	906,25	197,27	220,70	1,39	6,21
CR =4/5	5	3	1	976,	53	29
	468,75	125,00	757,81	56	7,11	2,97
CR =4/6	4	2	1	813,	44	24
	557,29	604,17	464,84	80	7,59	4,14
CR =4/7	3	2	1	697,	38	20
	906,25	232,14	255,58	54	3,65	9,26
CR =4/8	3	1	1	610,	33	18
	417,97	953,13	098,63	35	5,69	3,11

Таким чином, згідно розробленої методики була проведена оцінка зміни дальності дії та можливої швидкості передавання команд керування на борт БПЛА з використанням фізичного радіоінтерфейсу LoRa. Цей радіоінтерфейс заснований на використанні широкосмугових радіосигналів, що обумовлює його високу стійкість перед перешкодами. Отримані у результаті досліджень дані дозволяють стверджувати, що швидкість і дальність передавання команд керування з використанням технології LoRa є цілком прийнятною для керування БПЛА тактичної ланки.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи було досліджено необхідну інформацію про безпілотні літальні апарати, розглянуто сучасні моделі БПЛА та їх характеристики, проаналізовано технологію LoRa яка буде використовуватись для подальшого дослідження за обраною темою.

Метою дослідження є визначення можливості застосування технології LoRa для передавання команд керування БПЛА. Фізичний радіоінтерфейс LoRa заснований на використанні широкосмугових радіосигналів з базою, яка багато більша за одиницю, що обумовлює його високу стійкість перед перешкодами. Для передавання даних використовується CSS радіосигнал із шириною спектру, що може змінюватись від 125 до 500 кГц. Під час передавання цифрових даних відбувається адаптивна зміна бази радіосигналу з метою забезпечення необхідної якості зв'язку. При фіксованому значенні ширини спектру радіосигналу, це досягається за рахунок зміни тривалості символу даних. Отже дослідження спрямовані на підвищення завадостійкості радіолінії керування БПЛА шляхом застосування широкосмугової технології LoRa є актуальним.

У ході досліджень була розроблена методика розрахунку дальності зв'язку з БПЛА із застосуванням технології LoRa та визначений взаємозв'язок між дальністю дії радіолінії та інформаційною швидкістю.

Згідно розробленої методики була проведена оцінка зміни дальності дії та можливої швидкості передавання команд керування на борт БПЛА з використанням фізичного радіоінтерфейсу LoRa.

З отриманих у результаті досліджень даних передусь, що швидкість передавання даних по радіолінії можливо адаптивно змінювати в залежності від умов, які створюються під час передавання команд управління. При цьому, завжди може бути забезпечена необхідна для керування БПЛА швидкість передавання даних. Швидкість і дальність передавання команд керування, з використанням технології LoRa, є цілком прийнятною для керування БПЛА тактичної ланки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андреев О.В., Нестеренко К.О., Лещинський Ю.І. Особливості передавання цифрових даних з використанням бездротових технологій. Тези VI всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення». – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2023.
2. Unmanned aerial vehicle. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle
3. Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів/ Б. П. Книш, Я. А. Кулик, М. В. Барабан. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018_3/jrn/pdf/42.pdf
4. Безпілотний літальний апарат. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D1%96%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82
5. Основи побудови безпілотних роботизованих систем спеціального призначення : навчальний посібник / Ю.Г. Даник, П. П. Топольницький, І. В. Пулеко, П. В. Поздняков, А. В. Родіонов, М. В. Бугайов. – Житомир: ЖВІ, 2016. – 306 с.
6. Радіозв'язок: навч. посібн. / О.В. Андреев, В.Г. Парфенюк, П.П. Топольницький. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 214 с.
7. Застосування безпілотних літальних апаратів для здійснення радіомоніторингу й радіоконтролю/ В.В. Соколовський, Ю.В. Самсонов, М.І. Зюбан // Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил.– 2016. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/17222/nitps_2016_4_22.pdf

8. Фурія (БПЛА). [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%83%D1%80%D1%96%D1%8F_\(%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90\)](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%83%D1%80%D1%96%D1%8F_(%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90))
9. Лелека-100. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%B0-100>
10. АСУ-1 «Валькірія». [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%A1%D0%A3-1_%C2%AB%D0%92%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D1%96%D1%80%D1%96%D1%8F%C2%BB
11. Bayraktar TB2. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_TB2
12. Що таке БПЛА. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.peoplesproject.com/sho-take-bpla/>
13. A Brief History of LoRa: Three Inventors Share Their Story. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://blog-semtech-com.cdn.ampproject.org/v/s/blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference?amp_gsa=1&_js_v=a9&hs_amp=true&usqp=mq331AQIUAKwASCAAgM%3D#amp_tf=%D0%94%D0%B6%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%BE%3A%20%251%24s&aoh=16910623184668&referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com&share=https%3A%2F%2Fblog.semtech.com%2Fa-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference
14. Що таке технологія LoRa – Поглиблений посібник 2023. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mokosmart.com/uk/lora-technology/>
15. LoRa and LoRaWAN: Technical overview. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>

16. LoRa Security – LoRaWAN Tutorial. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.3glteinfo.com/lora/lora-security/>
17. Технологія LoRaWAN. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://deps.ua/ua/knowledgeable-base/reference-information/66634.html>
18. Яка технологія стоїть за частотою LoRa. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mokosmart.com/lora-frequency/>
19. Короткохвильовий цифровий широкосмуговий засіб зв'язку/ О.В. Андреев, В.В. Ципоренко, О.Є. Андреева, О.Р. Рихальський – 2019. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/171764/171848>
20. Введення в LoRa. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.proxis.ua/uk/show-article/147/>