

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 629.783

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій
к.т.н., доц. Нікітчук Т.М.

(підпис)

« 15 » 12 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему Дослідження завадостійкості радіоміної передачі
цифрових даних з дорізу міського апарату

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

Виконавець роботи:
студент 2 курсу, гр.ТРМ-19-1

 15.12.2020
(підпис, дата)

I.I. Колесник
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник
к.т.н., доц.

 15.12.2020
(підпис, дата)

О.В. Андреев
(ініціали, прізвище)

Житомир
2020

«Затверджено»

Завідувач кафедри біомедичної
інженерії та телекомунікацій

Т.М. Нікітчук

« 30 » 09 2020 р.

**Завдання
на кваліфікаційну магістерську роботу**

Колеснику Івану Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження завадостійкості радіолінії передачі цифрових даних з борту літального апарату

затверджено наказом по університету від « 16 » 10 2020 р. № 366/С

2. Мета дослідження: оцінка якісних показників передачі цифрових даних з борту безпілотного літального апарату

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.
ТТХ БПЛА "INDELA-ATA 5800+ "

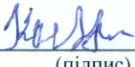
4. Основні задачі дослідження: розробити методику оцінки завадостійкості радіолінії передачі цифрових даних з борту БПЛА

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2020 р.

6. Дата видачі завдання «30» вересня 2020 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

(підпис)

Андрєєв О.В.
(прізвище, ініціали)

Колесник І.І.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній магістерській роботі виконано дослідження методики оцінки завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації БПЛА та було проведене дослідження ефективності руйнування корисної інформації, що передається по радіоканалу типових БЛА.

Розроблено алгоритм визначення ефективності руйнування радіолінії корисної інформації. За цим алгоритмом проведено експериментальні дослідження та зроблено висновки.

ABSTRACT

In this master`s work the study methodology for assessing noise immunity radio transmission of specific information and UAVs conducted studies of the effectiveness of destruction of useful information transmitted via radio standard UAVs.

An algorithm for determining the effectiveness of radio destruction of useful information. In this algorithm Experimental research and conclusions.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота складається з трьох розділів, висновків та переліку джерел посилання. Кваліфікаційна магістерська робота викладена на _ сторінках, що включає _ ілюстрації, _ таблиць. Перелік джерел посилання нараховує _ найменувань.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, відношення сигнал/шум, ймовірність бітової помилки, цифрова радіолінія.

Об'єктом досліджень є процес передачі корисної інформації, що передається по радіоканалу зв'язку на наземний пункт управління.

Предметом дослідження є методика визначення завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації типових БПЛА.

Мета і задачі дослідження. Визначення показників завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації типових БПЛА.

Методи дослідження. У роботі використано метод аналітичного та теоретичного аналізу значень, отриманих в ході розрахунку завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації типового БПЛА.

Практичне значення одержаних результатів. У роботі запропонована методика розрахунку показників завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації та проведена оцінка завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації типового БПЛА для різних відстаней від наземного пункту управління із використанням різних видів маніпуляції при передачі цифрових даних. Результати наукових досліджень доповідались на III Всеукраїнській науково-практичній інтернет- конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених 26-27 листопада м. Житомир [16].

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОБУДОВИ БПЛА.....	9
1.1 Загальні принципи побудови безпілотних літальних апаратів.....	9
1.2 Аналіз принципів побудови систем зв'язку з БПЛА.....	13
1.3 Аналіз бюджету каналу зв'язку з БПЛА.....	18
1.4 Максимальна дальність зв'язку БПЛА.....	19
1.5 Вибір виду модуляції.....	21
1.6 Аналіз каналу зв'язку.....	22
1.7 Дальність дії радіосистеми.....	25
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ДАНИХ З БПЛА.....	27
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ДАНИХ З БПЛА.....	36
3.1 Оцінка значення ВСШ на вході приймача цифрової радіолінії.....	36
3.2 Розрахунок ефективності руйнування корисної інформації цифрової радіолінії.....	40
3.3 Аналіз перспективних напрямів удосконалення цифрових радіоліній БПЛА.....	42
ВИСНОВКИ.....	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	50

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АР – антенна решітка;

АФП – антенно-фідерний пристрій;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ВСШ – відношення сигнал / шум;

ДС – діаграма спрямованості;

НПУ – наземний пункт управління;

НКУ – наземний комплекс управління;

НВЧ – надвисока частота;

ПП – постановник перешкоди;

УКХ – ультракороткохвильовий;

РЕБ – радіоелектронна боротьба;

РТР – радіоелектронна розвідка.

ВСТУП

З кожним роком безпілотні літальні апарати (БПЛА) набувають все більш широкого застосування у різних сферах послуг, господарства, та військовій справі. Польоти БПЛА стають все більш автоматизованими і через це з'являється потреба у контролі повітряного простору на малих висотах задля уникнення зіткнень та захисту стратегічно важливих об'єктів від несанкціонованих польотів на їх території [1].

Активний розвиток безпілотних та автоматизованих комплексів став можливим завдяки технічним рішенням, пов'язаним з розвитком систем автоматизованого управління, навігації, зростанням продуктивності і мініатюризацією мікропроцесорної техніки, з використанням перспективних телекомунікаційних засобів, а також із можливістю мінімізації втрат особового складу і техніки при веденні збройних конфліктів.

БПЛА з корисним навантаженням можна використовувати для ведення розвідувальних операцій, спостереження зовнішніх змін місцевого ландшафту, виявлення, ідентифікації та супроводу цілей; зв'язку між своїми підрозділами; ведення радіо– і радіотехнічної розвідки, радіоелектронної боротьби; виявлення і визначення конкретних слідів використання хімічної, біологічної, ядерної і будь–якого іншого виду зброї; перевезень різних вантажів; вирішення завдань пошуку і рятування; авіаційної підтримки; участі в повітряно–наступальній операції; контролю навколишнього середовища [2].

Тактика застосування БПЛА різноманітна і включає в себе не тільки політ на гранично малих висотах, в складках місцевості, застосування активних і пасивних перешкод, зниження радіо-помітності, рівня інфрачервоного випромінювання і акустичного шуму, а й найвищу маневреність (аж до зупинки («зависання») БПЛА в складках місцевості з подальшою зміною траєкторії польоту). Траєкторії польоту БПЛА можуть проходити на гранично малих висотах - 0,5 ... 2 м, в широкому діапазоні швидкостей - 0 ... 400км/год., в ущелинах і ярах, в тіні від місцевих

височин і за горизонтом, і тому їх виявлення РЛС військових зенітно-ракетних комплексів здійснити в цих умовах неможливо [2].

Боротьба з БПЛА включає в себе комплекс завдань з їх виявлення та розпізнавання, прийняттю рішення по активному знищенню або порушенню функціонування БПЛА шляхом руйнування лінії передачі команд керування, навігаційних систем та передачі корисної інформації.

Для оцінки завадостійкості цифрової радіолінії передачі корисної інформації у роботі розв'язувались наступні задачі:

- аналіз побудови БПЛА та радіолінії передачі даних від корисного навантаження;
- розробка методики оцінки завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації БПЛА;
- дослідження завадостійкості радіолінії передачі корисної інформації, що передається по радіоканалу типових БПЛА.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОБУДОВИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1 Загальні принципи побудови безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат – це літальний апарат багаторазового або умовно-багаторазового використання, що не має на борту екіпажу і здатний самостійно цілеспрямовано переміщуватися в повітрі для виконання різних функцій в автономному режимі (за допомогою власної керуючої програми) або за допомогою дистанційного керування (здійснюваного людиною-оператором зі стаціонарного або мобільного пульта керування).

БПЛА виконує такі основні завдання:

оптичну, радіометричну, радіолокаційну, радіо- і радіотехнічну, радіаційну, хімічну і бактеріологічну розвідку вдень і вночі;

виявлення мін і мінних полів та дій щодо їх установлення;

постановку активних і пасивних радіоелектронних завад радіо- і радіотехнічним засобам противника;

керування вогнем і цілевказівки наземній і морській артилерії;

завдання ударів по наземних цілях, виявлення й ураження РЛС, придушення засобів ППО противника;

ретрансляція повідомлень і даних тощо.

Основними складовими БПЛА є: повітряна платформа з системою посадки (за необхідності спеціальна система запуску), силова установка, джерело живлення для силової установки, система електроживлення, бортове радіоелектронне обладнання, до якого належить бортове обладнання керування й електронні елементи цільового навантаження. Узагальнена структурна схема БПЛА наведена на рис.1.1. Незалежно від задач, що стоять перед БПЛА, вся його бортова апаратура поділяється на апаратуру цільового призначення і забезпечувальну апаратуру – авіоніку [2].

Апаратура цільового призначення, або, коротко, цільова апаратура, виконує головні задачі БПЛА. Її також називають основною або спеціальною апаратурою.

При розв'язанні задач управління, як правило, всю цільову апаратуру об'єднують під загальною назвою бортовий спеціальний комплекс (БСК).

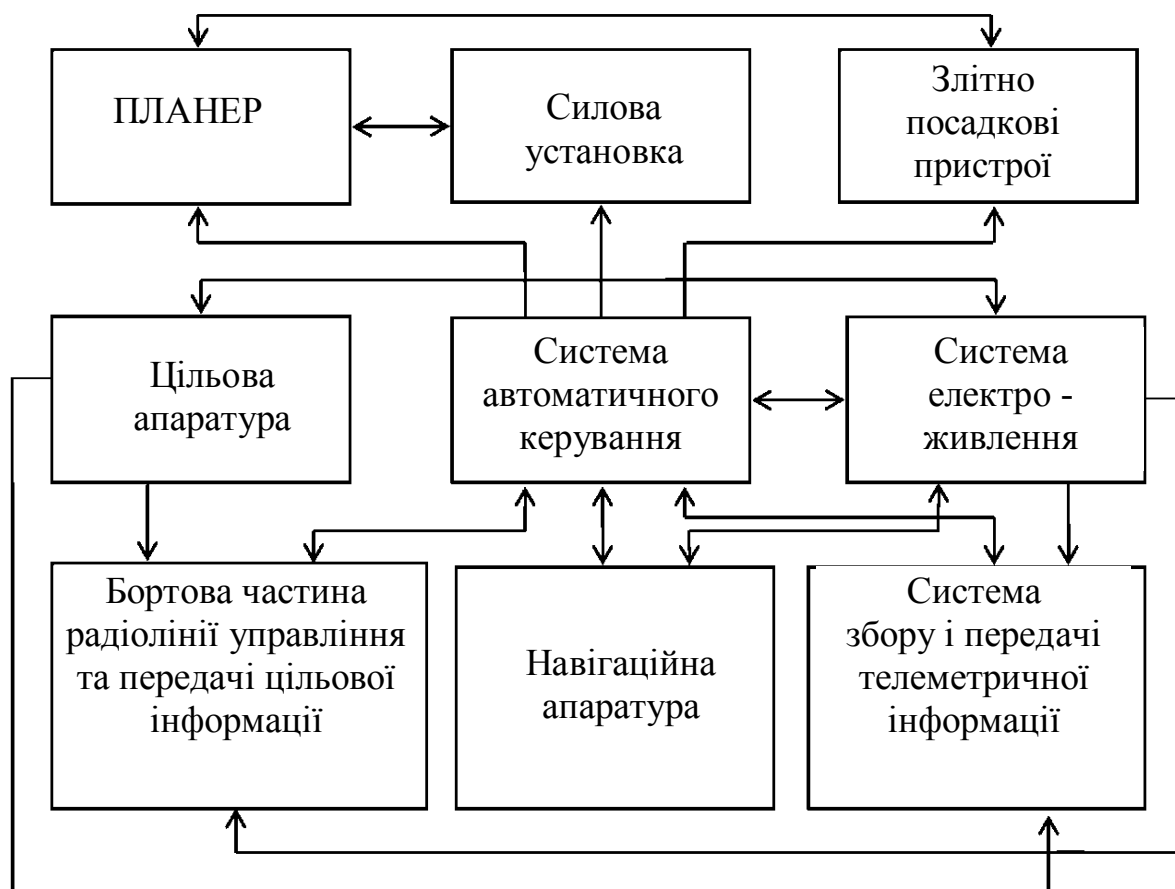


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема БПЛА

До забезпечувальної апаратури відноситься вся бортова апаратура, що не є цільовою. Роль її полягає в забезпеченні роботи цільової апаратури й у виконанні самостійних задач, що супроводжують цільові задачі. Часто забезпечувальну апаратуру називають службовою або допоміжною. За виконуваними функціями вся службова апаратура поділяється на апаратуру загального призначення й апаратуру, що забезпечує управління БПЛА. Як правило, службова апаратура, що забезпечує управління БПЛА, носить назву бортового комплексу управління (БКУ). Апаратура загального призначення забезпечує загальні умови функціонування цільової апаратури і БПЛА в цілому. Працює дана апаратура протягом усього періоду активного функціонування БПЛА. До забезпечувальної апаратури загального призначення відносяться автопілот, система електроживлення та інші (наприклад, датчики).

Апаратура БКУ виконує відносно самостійні функції. У її склад входять прилади і пристрої, що забезпечують одержання інформації про стан БПЛА (наприклад, проведення траєкторних або телеметричних вимірів), а також пристрої, що забезпечують реалізацію управління БПЛА. Працює дана апаратура лише при виконанні відповідних функцій.

До складу БКУ входять: система управління орієнтацією і стабілізацією, система управління рухом (рушійний пристрій), система навігації, телеметрична система (ТМС), апаратура командно-вимірювальної системи, бортова цифрова обчислювальна машина (БЦОМ).

Залежно від призначення БПЛА конкретний склад систем може змінюватися, зберігаючи свою основу.

БПЛА є складовою так званих безпілотних авіаційних комплексів.

Під безпілотним авіаційним комплексом (БПАК) слід розуміти сукупність одного або декількох БПЛА, засобів забезпечення їх запуску, керування і зв'язку, отримання і обробки цільової, службової та спеціальної інформації, технічного обслуговування і транспортування.

Основними елементами БПАК є [2]:

платформа БПЛА та бортове обладнання комплексної системи керування;
наземна система управління;
корисне навантаження;
підсистема зв'язку;
підсистема запуску та посадки БПЛА.

Підсистема запуску та посадки БПЛА представляє собою стаціонарний або мобільний пункт, на який покладаються завдання підготовки до запуску та запуску повітряної платформи, а також посадки та проведення після польотних процедур.

Наземна система управління є основним елементом безпілотного авіаційного комплексу, який виконує функції керування польотом автономно або за командами від центру планування застосування БПЛА, а також здійснює прийом даних від бортового корисного навантаження, управління корисним навантаженням в

реальному масштабі часу, забезпечує обмін інформацією між БПЛА та зовнішніми користувачами.

У системах керування безпілотних засобів різного призначення можуть використовуватися як принципи програмного керування, так і методи командного радіокерування або телекерування.

Під телекеруванням розуміється керування ЛА шляхом вироблення і передавання на борт керованого об'єкта команд для впливу на положення рульових елементів.

Комплексна система керування безпілотних засобів різного призначення, як правило, являє собою сукупність функціональних вузлів (окремих систем) і містить: інерційні навігаційні засоби; космічні навігаційні засоби; засоби автономного керування (за програмою); засоби дистанційного (ручного) керування; апаратуру передавання даних.

До складу *бортового обладнання керування* входять бортова електронно-обчислювальна машина або спеціальні обчислювачі чи спеціальні процесори, приймач сигналів радіонавігаційної системи, висотомір, гіровертикаль, бортова система зв'язку і передачі даних, рульові машинки.

Особливу роль у комплексній системі керування займає *система зв'язку і передачі даних*. Ця система є основною для телекерованих безпілотних засобів різного призначення і складається, як правило, з трьох радіоканалів: командного, телеметричного й інформаційного, утворених відповідними радіолініями і апаратурою прийому, обробки і передачі даних.

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.

Телеметричний канал призначений для передачі квитанцій про виконання команд, що надходять на борт, та телеметричних параметрів, за якими контролюється стан підсистем БПЛА.

Інформаційний канал призначений для передачі сигналів від бортового корисного навантаження. Як правило, інформаційний і телеметричний канали об'єднані в один зворотний радіоканал, на відміну від командного – прямого каналу.

Корисне навантаження БПЛА (рис.1.2) – бортові технічні засоби, призначені для виконання задач БПЛА за його призначенням: засоби розвідки (відео та інфрачервона камери, РСА), апаратура радіоелектронної боротьби (РЕБ), та ін. При цьому корисна інформація може доставлятися користувачам як після повернення БПЛА на місце базування так і передаватися безпосередньо в польоті на пункт наземного управління [2].

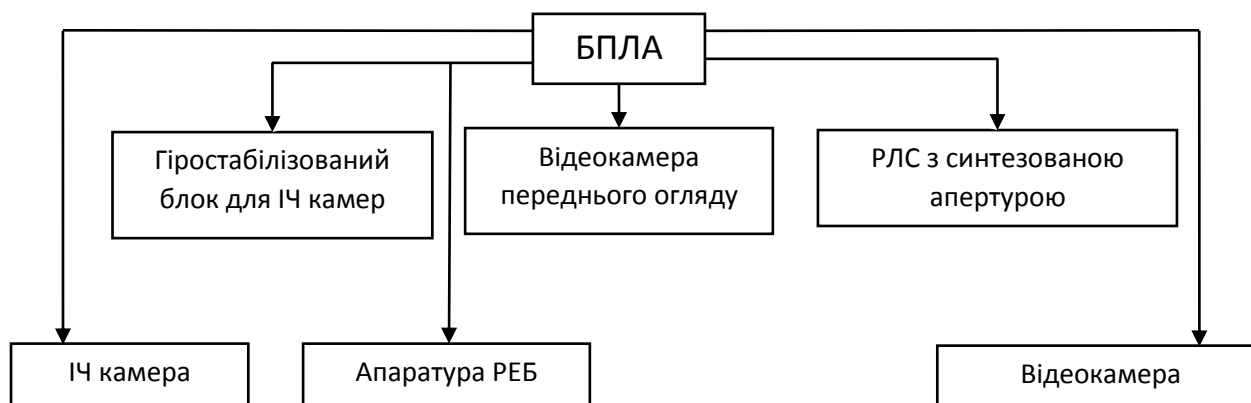


Рисунок 1.2 – Основне корисне навантаження БПЛА

Залежно від розв'язуваних завдань до складу корисного навантаження БПЛА може входити телевізійна або інфрачервона камера, цифровий фотоапарат або радіолокаційна станція.

1.2 Аналіз принципів побудови систем зв'язку з БПЛА

Лінія радіозв'язку літального апарату (ЛА) 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.).

Радіолінії НПУ-БПЛА і БПЛА-НПУ істотно розрізняються по пропускній здатності: радіолінія НПУ-БПЛА являє собою вузькосмуговий канал зв'язку, тому обсяг переданої інформації, навіть за повний час польоту БПЛА та роботи його обладнання, невеликий. 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. За не один рік наукових досліджень, проектувань та випробовувань у різних країнах світу були прийняті свої параметри, як основні, для передачі корисної інформації по радіоканалам.

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 обладнання 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. Одним з відповідних частотних діапазонів є діапазон 2,4 ГГц [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 (див рис. 1.3).

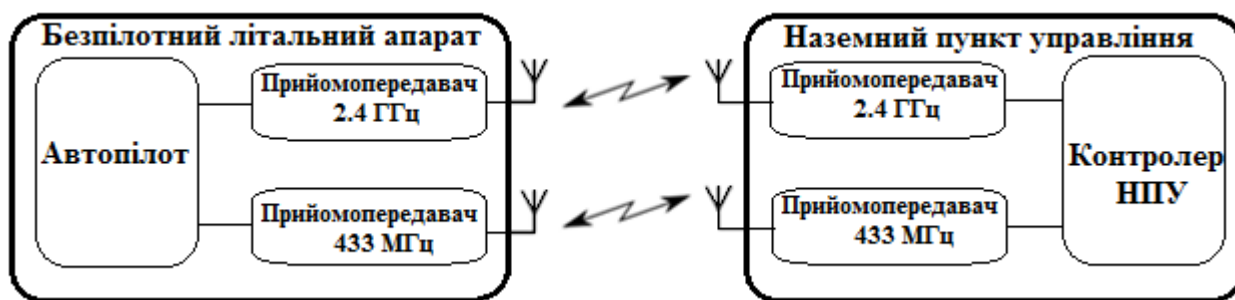


Рисунок 1.3. - Приклад комплексування радіоканалів зв'язку

У процесі роботи системи зв'язку 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. Одним із способів підвищення ефективності комплексування системи зв'язку є адаптивна робота системи, яка передбачає передачу по командно-телеметричним каналам зв'язку частини даних корисного навантаження, обсяг яких варіюється залежно від поточних умов передачі радіосигналу [5].

Як правило, максимальна відстань для прямого радіозв'язку між БПЛА цивільного призначення та НПУ на сьогоднішній день складає не більше 100км. Для командно-телеметричного зв'язку на великих відстанях можливе використання

супутникового зв'язку. У цьому випадку потік даних обмежується мінімально необхідною інформацією про стан БПЛА, інтервал передачі якої може становити, наприклад, від 30 до 300 секунд [6].

Перспективним напрямком 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 (наприклад, це можуть бути зображення з датчиків випромінювання різного діапазону довжин хвиль). Факторами, які різко обмежують радіус дії радіосистеми зв'язку при використанні даних діапазонів, є сильна залежність умов поширення електромагнітних хвиль від погодних умов, необхідність прямої видимості і вплив багатопроміневості [6].

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 [5]:

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

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 - експонента втрати на трасі, яка залежить від навколишнього середовища;

X_σ - логарифмічно нормальне завмирання внаслідок затінення.

У безпілотних літальних системах еталонна відстань d_0 обирається рівною робочій висоті БПЛА. Середні втрати $L(d_0)$ при поширенні у вільному просторі розраховуються за формулою [5]:

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

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 $X_\sigma = 0$) [5]:

$$L(d)[\text{дБ}] = 10\gamma \lg(d) + (20 - 10\gamma) \lg(d_0) + 20 \lg(f) + 32,45. \quad (1.3)$$

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

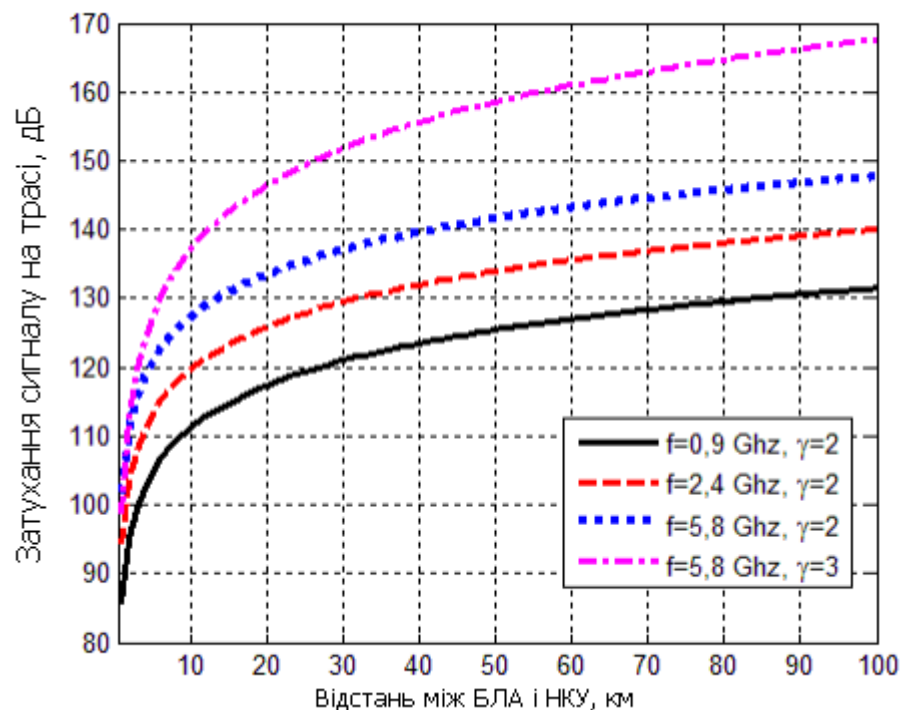


Рисунок 1.4. - Затування сигналу на трасі в залежності від відстані між БПЛА і НКУ для трьох різних частот

З рис.1.4. видно, що при відстані між БПЛА і НКУ 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).

1.3 Аналіз бюджету каналу зв'язку з БПЛА

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]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R}{P_{\text{ш}}} \left(\frac{W}{R} \right), \quad (1.4)$$

де P_R - потужність прийнятого сигналу;

$P_{\text{ш}}$ - 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):

$$M(\text{дБ}) = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{прийн}} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{потр}}. \quad (1.5)$$

Потужність, прийнята приймальною антеною визначається виразом [6]:

$$P_R(d)(\text{дБ}) = P_T(\text{дБ}) + G_R(\text{дБ}) + G_T(\text{дБ}) - L_s(\text{дБ}) - L_0(\text{дБ}), \quad (1.6)$$

де G_R і G_T - коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен;

P_T - передана потужність;

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

L_s — втрати в тракті.

З рівнянь (1.4), (1.5) і (1.6), отримуємо наступне:

$$M(\text{дБ}) = P_T(\text{дБм}) + G_R(\text{дБ}) + G_T(\text{дБ}) - L_s(\text{дБ}) - L_0(\text{дБ}) - P_s(\text{дБм}), \quad (1.7)$$

де P_s - чутливість приймача, дБ.

При роботі БПЛА в межах прямої видимості з НКУ діапазон змін рівня сигналу через завмирання може досягати 15 дБ [6]. Енергетичний запас M використовується для компенсації цих завмирань.

Розглянемо випадок, коли безпілотна літальна система використовує діапазон частот 2,4 ГГц для передачі даних, наземну антену з великим коефіцієнтом посилення 24 дБі, антену на борту з коефіцієнтом посилення 5 дБі, передавач БПЛА з вихідною потужністю 30 дБ (1 Вт), приймач НКУ з чутливістю -90 дБ, бюджет каналу зв'язку 15 дБ. Вважаємо, що $\gamma = 2$ (поширення у вільному просторі), $d_0 = 1$ км, $L_0 = 6$ дБ (втрати у фідері і роз'ємах НКУ рівні 1,5 дБ, втрати в бортовому фідері і роз'ємах - 1,5 дБ, поляризаційна неузгодженість антен - 3 дБ). У цьому випадку максимальна дальність зв'язку каналу передачі даних з БПЛА на НКУ становить 12,5 км. При зменшенні значення енергетичного запасу на завмирання до 10 дБ дальність зв'язку каналу передачі даних буде дорівнювати 22,2 км [6].

При застосуванні гостроспрямованої антени з великим коефіцієнтом посилення (більше 20 дБ) в НКУ ширина діаграми спрямованості мала (менше 10 °), що накладає обмеження на застосування їх в умовах близького польоту БПЛА. Можливе використання двох типів антен НКУ для різних дальностей польоту БПЛА: антени з посиленням 5-8 дБ для умов ближнього польоту і антени з посиленням більше 20 дБі для умов дальнього польоту. Однак у цьому випадку необхідне використання опорно-поворотного пристрою і системи спостереження за БПЛА. Так як до наземного обладнання не пред'являється жорстких вимог по масово-габаритних характеристиках, використання в якості антени НКУ скануючої цифрової антенної решітки (АР) не завжди виправдано з огляду на її велику вартість, за винятком випадку використання АР для одночасного спостереження за декількома БПЛА.

1.4 Максимальна дальність зв'язку БПЛА

Розглянемо можливі ситуації взаємного розташування БПЛА та НКУ (див. 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 [7]:

$$d_{LOS} = \sqrt{2 \cdot R_3 \cdot h_1 + h_1^2} + \sqrt{2 \cdot R_3 \cdot h_2 + h_2^2}, \quad (1.8)$$

де h_1 - висота підйому наземної антени, м;

h_2 - висота підйому бортової антени, м;

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

R_3 – радіус Землі ($R_3 = 6400$ км для високих радіочастот).

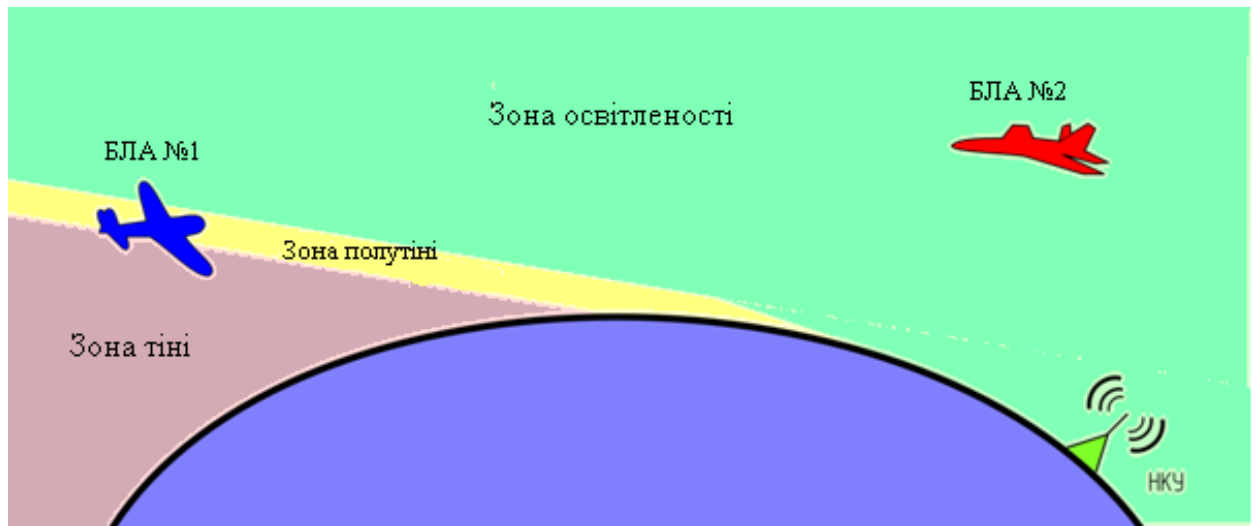


Рисунок 1.5. - Зони освітленості, півтіні і тіні

А на рис. 1.6 показана залежність максимальної дальності радіозв'язку від висоти польоту БПЛА при деяких заданих висотах підйому антени НКУ. Антена НКУ 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 НКУ 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. З рис.1.6 випливає, що залежність граничної дальності зв'язку від висоти підйому антени НКУ (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] :

$$d_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1.9)$$

де h_1 - висота підйому першої антени, м;

h_2 - висота підйому другої антени, м.

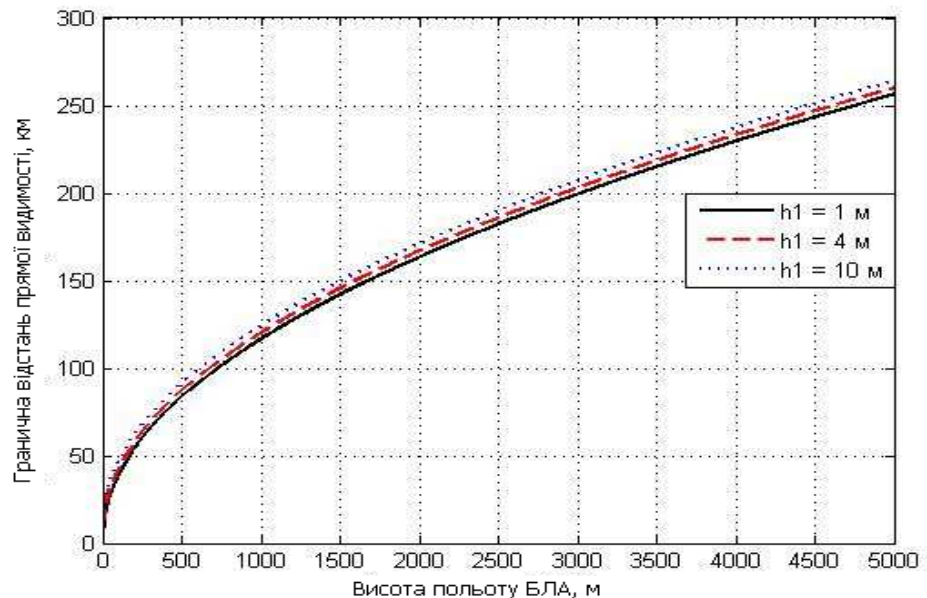


Рисунок 1.6. - Максимальна дальність зв'язку в залежності від висоти підйому антен БПЛА та НКУ

1.5 Вибір виду модуляції

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 НКУ. Для порівняння енергетичної ефективності, на рис.1.7 показано декілька видів модуляції по каналу з гаусівським шумом. 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 НКУ 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. 1.6, при зміні відстані між БПЛА і НКУ в широких межах (500 м - 30 км) потужність сигналу з несучою 2,4 ГГц на вході приймача буде змінюватися близько 35 дБ.

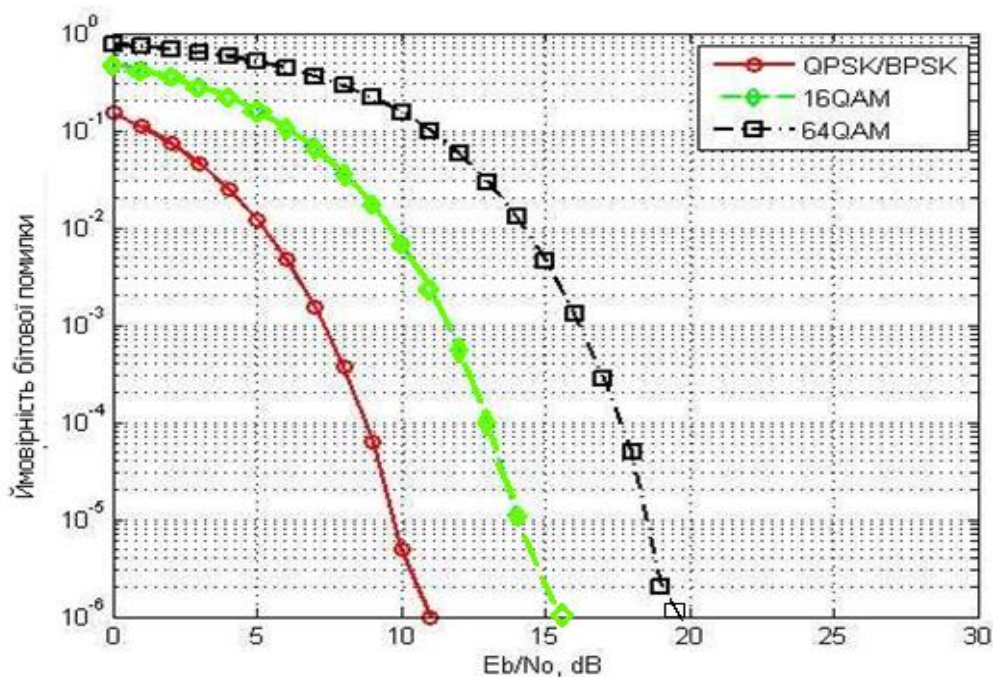


Рисунок 1.7. - Ймовірність бітової помилки для різних видів модуляції

Такий великий енергетичний запас дозволяє використовувати різні види модуляції для підвищення швидкості передачі даних з БПЛА на НКУ 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].

1.6 Аналіз каналу зв'язку

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 затухання сигналу від відстані між БПЛА і НКУ для двох частот (рис. 1.8). Втрати радіосигналу на трасі розраховуються за формулою (1.2) [7]. І як видно з рис.1.8, затухання сигналу в діапазоні 2,4 ГГц при відстані між БЛА і НКУ 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 (рисунок 1.7), підвищення вихідної потужності передавачів до максимально дозволеної.

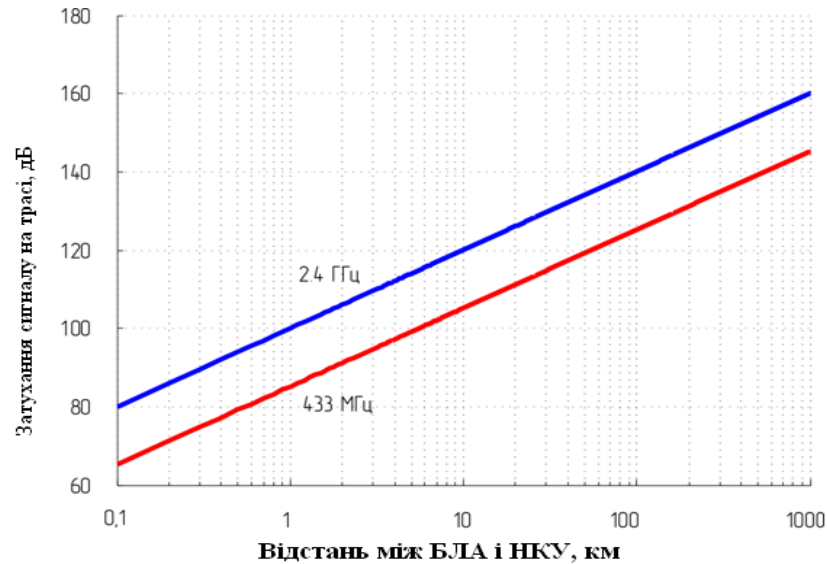


Рисунок 1.8. - Затування сигналу на трасі в залежності від відстані між БЛА і НКУ для двох різних частот

Визначимо потужність теплового шуму на вході приймача за формулою [7] :

$$P_{\text{ш}} = N_0 \cdot \Delta f, \quad (1.10)$$

де $P_{\text{ш}}$ – потужність шуму;

N_0 – спектральна щільність потужності шуму;

Δf – ширина смуги пропускання, Гц.

При максимально можливій ширині смуги частот для діапазону 2,4 ГГц $\Delta f = 22$ МГц [4] і спектральній щільності потужності шуму $N_0 = 441,6 \cdot 10^{-23}$ Дж, потужність теплового шуму на вході приймача буде $P_{\text{ш}} = -100$ дБ.

Розрахуємо необхідне ВСШ на вході приймача для досягнення заданої якості зв'язку за формулою (1.4) [5].

Для значення ймовірності бітової помилки $P_{\text{BER}} = 10^{-6}$ відношення

$E_B / N_0 = 12$ дБ, для $P_{\text{BER}} = 10^{-3}$ відношення $E_B / N_0 = 7$ дБ (рисунок 1.7), при відношенні $R / B_T = 0,5$ отримаємо наступні ВСШ на вході приймача: 9 дБ і 4 дБ відповідно. Потужність сигналу на вході приймача повинна бути не нижче рівня

потужності шуму. Крім того, значення необхідних ВСШ можуть бути зменшені при спектральному розширенні сигналу. Так, наприклад, при розширенні спектру прямої послідовністю Баркера завдовжки 11 біт графік залежності значення ймовірності бітової помилки від ВСШ (рисунок 1.7) зміститься вліво, для $P_{BER} = 10^{-6}$ на ~ 5 дБ. Зведемо в таблицю 1.1 отримані дані.

Як видно з таблиці 1.2, для забезпечення зв'язку між бортом БПЛА та НКУ в діапазоні 2,4 ГГц на відстані 30 км необхідно мати бортову антену з великим коефіцієнтом посилення (більше 20 дБ). Ширина діаграми спрямованості (ДС) такого типу антен менше 10° , що накладає обмеження на застосування їх в умовах близьких до польоту БПЛА.

Таблиця 1.1 - Аналіз каналу зв'язку

Найменування позиції	Посилення / ослаблення, (дБ)	Усього
Вихідна потужність передавача борта	+30	+30
Втрати у фідері і роз'ємах борта	-1,5	+28,5
Посилення антени борта	+2	+30,5
Втрати на поширення (2,4 ГГц, 30 км)	-130	-99,5
Посилення антени НКУ	+24	-75,5
Втрати в фідері і роз'ємах НКУ	-1,5	-77
Чутливість приймача	-90	+13
Разом, бюджет каналу зв'язку		13

Є доцільним використання двох типів антен для різних дальностей польоту БПЛА: з посиленням ~ 8 дБ для умов ближнього польоту і більше 20 дБ для умов дальнього польоту. Вимоги до опорно-поворотного влаштування антени НКУ визначаються виходячи з ширини ДС антени: допустима похибка встановлення

поворотною платформою азимутального кута і кута піднесення антени не повинна перевищувати половину ширини ДС. У разі встановлення антени з посиленням 27 дБ ширина ДС складе приблизно 6° , тоді допустима похибка становитиме 3° .

1.7 Дальність дії радіосистеми

Дальність дії є однією з найважливіших характеристик більшості радіосистем. Під дальністю дії розуміють максимальну відстань $R = R_{\text{макс}}$, на якій приймається сигнал, який досягає мінімально допустимого (граничного) рівня $P_c = P_{\text{мин}}$, ще достатньо для виконання системою основних функцій з якісними показниками не гірше заданих.

Розглянемо максимальну дальність дії радіолінії, застосовуваних у радіосистемах різного призначення: радіолінії зв'язку, радіолінії з активною відповіддю і радіолінії з пасивною відповіддю.

У нашому випадку нас цікавить радіолінія зв'язку. Радіолінії зв'язку складаються з передавача і приймача радіосигналу. Припустимо, що в радіолінії використовуються радіохвилі завдовжки $\lambda_{\text{п}}$, потужність випромінюваних передавальною антеною коливань $P_{\text{в}}$, її коефіцієнт підсилення $G_{\text{в}}$, коефіцієнт підсилення приймальної антени $G_{\text{п}}$ і чутливість приймача (потужність граничного сигналу) $P_{\text{с мин}}$.

Щільність потоку потужності створюваного випромінюваним сигналом в місці розташування прийомної антени на відстані D від передавальної дорівнює

$\Pi = \frac{P_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}}}{4\pi R^2}$, а потужність сигналу у приймальній антені [8]:

$$P_c = \Pi A_{\text{п}} = \frac{P_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}} \cdot A_{\text{п}}}{4\pi D^2} = \frac{P_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}} \cdot \lambda_{\text{п}}^2}{(4\pi)^2 R^2}, \quad (1.11)$$

де $A_{\text{п}} = \lambda_{\text{п}}^2 G_{\text{п}} / (4\pi)$ – ефективна площа приймальної антени.

При збільшенні дальності R потужність сигналу падає і досягає граничного рівня $P_c = P_{\text{с мин}}$, що обмежує максимальне значення дальності радіолінії [8]:

$$R_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{P_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}} \cdot G_{\text{п}} \cdot \lambda_{\text{п}}^2}{(4\pi)^2 P_{\text{с мин}}}}, \quad (1.12)$$

Потужність $P_{с\text{ мин}}$ повинна бути достатньою для добування інформації з заданою вірогідністю при наявності перешкод, включаючи і власний шум приймача, приведений до його входу [8].

Отже, зміна параметрів роботи систем зв'язку з БПЛА, що обумовлена зміною взаємного розташування БПЛА і НПУ і впливом середовища поширення сигналу, призводить до необхідності адаптивної зміни основних параметрів системи (вид модуляції, кодування, швидкість передачі даних та ін.) залежно від умов проходження сигналу, яке дозволяє більш ефективно використовувати енергетичний ресурс каналу зв'язку і багаторазово підвищувати ефективність роботи системи. Дальність зв'язку БПЛА залежить від багатьох факторів, у тому числі висоти БПЛА, потужності передавача БПЛА, чутливості приймача НПУ, типів антен на борту БПЛА і на НПУ, виду модуляції та ін. Для збільшення дальності дії малорозмірних БПЛА необхідне використання енергетично вигідних видів модуляції та наземної антени з високим коефіцієнтом посилення. У деяких випадках для забезпечення стійкого зв'язку з віддаленим БПЛА потрібно використовувати інший БПЛА як ретранслятор сигналу. Для передачі даних (фотознімків, відеозображень) з БПЛА на наземний пункт управління в реальному часі потрібна велика швидкість передачі. Найбільш поширеними для передачі корисної інформації по радіолінії БЛА є такі види маніпуляції: BPSK, 16QAM, 64QAM. Саме ці види маніпуляцій будуть розглянуті в подальшому у роботі.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ДАНИХ З БПЛА

У зв'язку з тим, що БПЛА має подвійне призначення, то оцінка завадостійкості передачі цифрових даних з БПЛА на НПУ повинна проводитись як для умов передавання даних на фоні білого шуму, так і в умовах постановки активної перешкоди. При цьому, радіолінія буде виконувати своє призначення з показниками якості не гірше заданих, якщо на вході приймача НПУ буде створюватись відношення сигнал/шум, яке відповідає забезпеченню припустимої похибки передачі біта інформації (див. рис.1.5) при певному виді маніпуляції несучого коливання бортового передавача цифровим сигналом.

Тому, перш за все, необхідно задати значення припустимої похибки передачі біта інформації, а потім, обравши потрібний вид модуляції, отримати мінімально необхідне значення ВШ S/N в цифровій радіолінії передачі даних $q_{min} = \frac{P_c}{P_{ш0}}$.

Щоб знайти ВШ нам необхідно визначити потужність теплового шуму на вході приймача $P_{ш0} = N_0 \cdot \Delta f_c$. Ширина смуги пропускання Δf_c залежить також від виду модуляції, а спектральна щільність потужності шуму N_0 , може бути визначена з формули [12]:

$$N_0 = k(T_a + T_{ш}), \quad (2.1)$$

де k – стала Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T_a – шумова температура антени НПУ;

$T_{ш}$ – шумова температура приймача НПУ.

Розглянемо питання визначення порогової чутливості радіоприймального пристрою. Для граничної чутливості радіоприймального пристрою $\frac{P_{с вих}}{P_{ш вих}} = 1$, а

враховуючи, що $P_{ш вих} = kT_0 \Delta f_c$, вираз для коефіцієнта шуму радіоприймального пристрою буде подаватися таким рівнянням [8]:

$$K_{ш} = \frac{P_{с\ вх}}{kT_0\Delta f_c}, \quad (2.2)$$

де $P_{с\ вх}$ - гранична чутливість радіоприймального пристрою;

k – стала Больцмана;

$T_0 = 290\ K$ – температура, при якій знаходиться приймач.

Тоді гранична чутливість радіоприймального пристрою $P_{с\ вх} = K_{ш}kT_0\Delta f_c$.

Якщо вхідний опір радіоприймального пристрою $R_{вх}$, то гранична напруга на вході радіоприймального пристрою буде визначатися виразом :

$$U_{вх} = \sqrt{P_{с\ вх} R_{вх}} = \sqrt{K_{ш}kT_0\Pi R_{вх}}.$$

Для отримання порогової чутливості приймача $P_{с\ min}$, при якій відношення

$\frac{P_{с\ вих}}{P_{ш\ вих}} = S/N$, значення граничної напруги на вході радіоприймального пристрою також повинно бути збільшено на це значення.

На практиці у більшості випадків порогова чутливість приймача задається у мкВ. Тому для визначення порогової чутливості приймача у Вт достатньо визначити значення $P_{с\ вх}$ та збільшити його на значення S/N .

Наприклад, вхідний опір широкосмугового скануючого приймача AR5000 [17], що використовується для радіомоніторингу випромінювань радіо засобів, складає 50 Ом, а його порогова чутливість при модуляції FM із смугою $\Pi=220\ кГц$, у діапазоні частот 2 – 40 МГц дорівнює 1,58 мкВ, при значенні $SINAD = 12\ дБ$. Визначимо порогову чутливість приймача у Вт. Отримаємо

граничну чутливість приймача, зменшивши порогову чутливість приймача у 3,98 рази, тобто $U_{\text{вх}} = 1,58 / 3,98 = 0,4 \text{ мкВ}$. Визначимо з виразу (2.4) граничну чутливість

приймача $P_{\text{с вх}} = U_{\text{вх}}^2 / R_{\text{вх}} = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$. Збільшивши це значення на величину

$SINAD$, отримаємо порогову чутливість приймача AR5000: $P_{\text{с min}} = 5,1 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}$.

З виразу (2.2) можна також визначити значення коефіцієнта шуму радіоприймального пристрою, який для даного прикладу складає

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с вх}}}{kT_0\Pi} = 3,6.$$

Для визначення потужності шуму на вході приймача також необхідно враховувати і зовнішні джерела шуму. Напряга шуму визначається за виразом Найквіста [9]:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4kT\Pi_{\text{ш}}R},$$

де T – шумова температура;

$\Pi_{\text{ш}}$ – смуга частот вимірювань.

З цього виразу можливо визначити шумову температуру T , а отже і визначити потужність шуму на вході приймача, що створюється зовнішніми джерелами за

виразом $P_{\text{ш зв}} = kT\Pi$.

Для визначення потужності шуму, що створюється на вході приймача зовнішніми джерелами, можна скористатися графіками, що наведені на рис.2.1 [12].

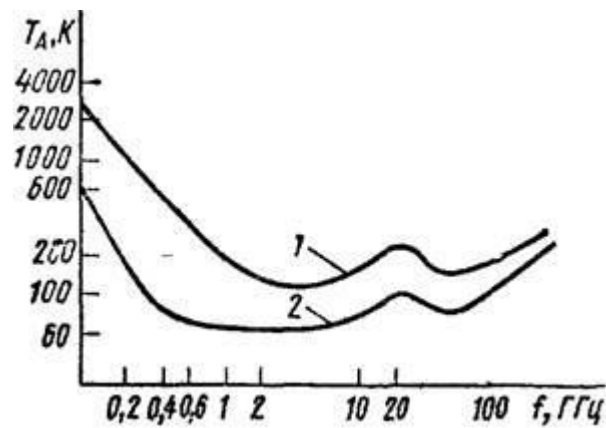


Рисунок 2.1. - Залежність шумової температури приймальної антени T_a від частоти (1 – макс., 2 – мін.)

Шумова температура наземного приймача знаходиться за формулою $T_{ш} = T_0(K_{ш} - 1)$ [14]. Також показник $T_{ш}$ можемо знайти за рис.2.2 [14].

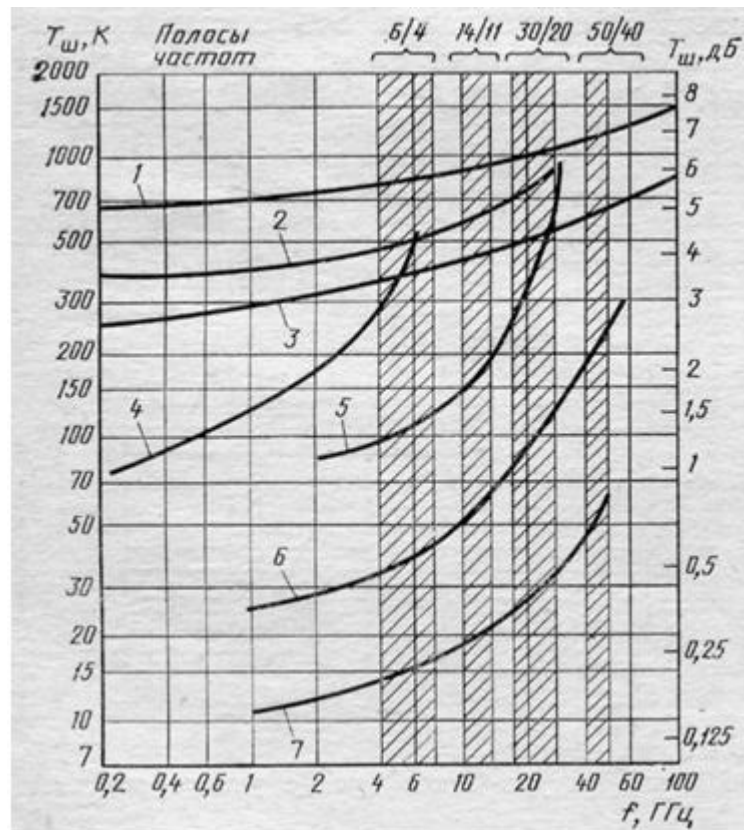


Рисунок 2.2. – Шумові характеристики різних типів МШП в залежності від частоти.

Знайти потужність корисного сигналу на вході приймача можна з формули [8]:

$$P_c = \frac{P_v \cdot G_v \cdot G_n \cdot \lambda_n^2 \cdot \gamma \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{(4\pi)^2 R^2}, \quad (2.3)$$

де P_B - потужність випромінюваних передавальною антеною коливань;

G_B - коефіцієнт підсилення передавальної антени;

G_{Π} - коефіцієнт підсилення приймальної антени;

λ - довжина хвилі;

R - дальність між БПЛА і НПУ;

η_1, η_2 - коефіцієнти корисної дії антенно-фідерного передавального та приймального трактів;

γ - послаблення сигналу через погодні умови і атмосферу.

Основне поглинання енергії сигналу викликають кисень і водяна пара. На рис. 2.3 показані теоретичні залежності погонного ослаблення рівня сигналу γ , дБ / км, від частоти при стандартному тиску повітря, температурі 20 ° С і концентрації ρ водяної пари 7,5 г / м³ [15].

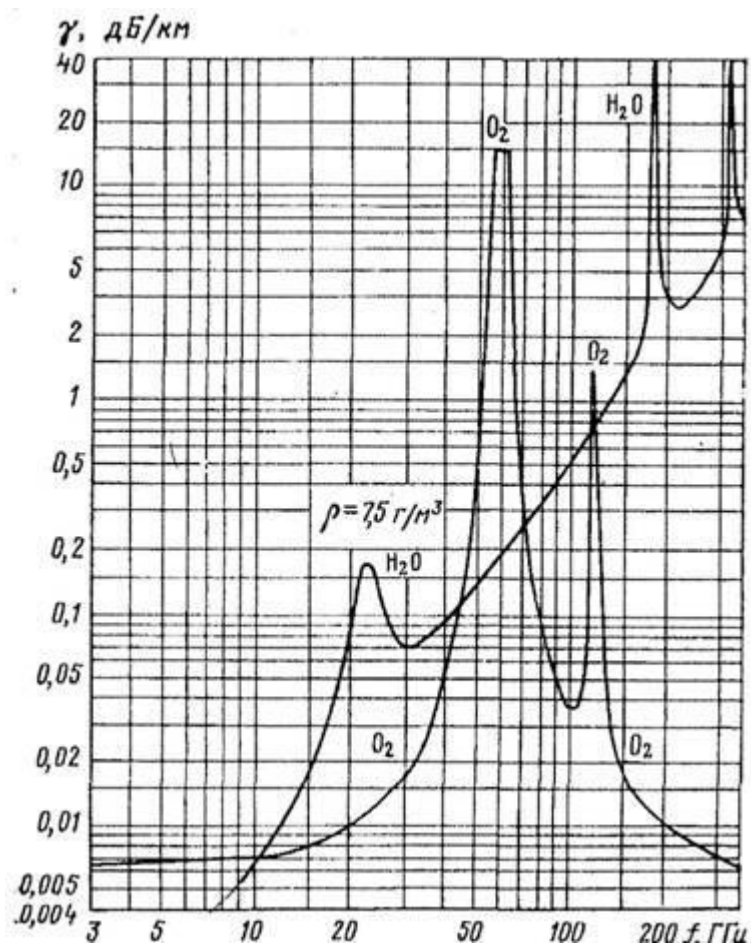


Рисунок 2.3. - Залежності погонного послаблення рівня сигналів від частоти при стандартному тиску повітря, температурі 20 ° С і концентрації водяної пари

Радіопротидією (РП) називають сукупність технічних заходів, спрямованих на зниження ефективності роботи радіоелектронних засобів противника. З метою порушення роботи радіолінії будемо розглядати лише активну протидію, яка полягає у випромінюванні сигналів, які, потрапляючи на вхід приймача НПУ, підвищують еквівалентний рівня потужності зовнішніх шумів, знижуючи ефективність роботи радіолінії. Ефективність активної РП багато в чому залежить від того, які сигнали застосовує система РП, звана надалі постановником перешкод (ПП). Активні перешкоди за характером впливу на РТС - діляться на маскуючі та імітаційні. Перешкоди першого типу, створюючи фон який заважає, ускладнюють виявлення корисних сигналів, їх розрізнення і оцінку параметрів. За своїм характером маскуючі перешкоди можуть бути випадковими (шумовими) або детермінованими, безперервними в часі або імпульсними [8].

В залежності від співвідношення ширини спектра сигналу Δf_c і перешкоди Δf_{nn} розрізняють прицільні ($\Delta f_c \approx \Delta f_{nn}$) і загороджувальні ($\Delta f_{nn} \gg \Delta f_c$) шумові перешкоди. Дія активних перешкод призводить до зменшення відношення сигнал/шум (ВСШ) на вході приймача НКУ, що створюється корисним сигналом:

$$q_n = \frac{P_c}{P_{ш0} + mP_{nc}}, \quad (2.4)$$

де P_{nc} - потужність сигналу, що створюється на вході приймача НКУ постановником перешкод ;

$P_{ш0}$ - потужність шуму у смузі приймача НКУ;

$$m = \frac{\Delta f_c}{\Delta f_{nn}}.$$

Значення потужності сигналу, що створюється на вході приймача НКУ постановником перешкод, що знаходиться на віддаленні $R_{пп}$ від НКУ, можна визначити згідно виразу [9]:

$$P_{nc} = \frac{P_{en} G_{en} G_n K_{БЛ} \gamma \lambda_{nn}^2 \eta_2 \eta_3}{(4\pi)^2 R_{nn}^2}, \quad (2.5)$$

де G_{en} - коефіцієнт підсилення передавальної антени ПП;

P_{en} - потужність коливань, випромінюваних передавальною антеною ПП;

λ_{nn} - довжина хвилі ПП;

$K_{БЛ}$ - коефіцієнт, що характеризує рівень бічної пелюстки приймальної антени НКУ;

η_3 - коефіцієнт корисної дії антенно - фідерного тракту ПП.

За цими словами розуміють відносний рівень найбільшої бокової пелюстки ДС. Як правило, найбільшою за величиною є перша бокова пелюстка. Наприклад, рівень першої бокової пелюстки дзеркальної антени, що наведене на рис. 2.4, зазвичай приймають приблизно 0,2. Прогалини між головною і боковою пелюстками приблизно приймають 0,01 [11].

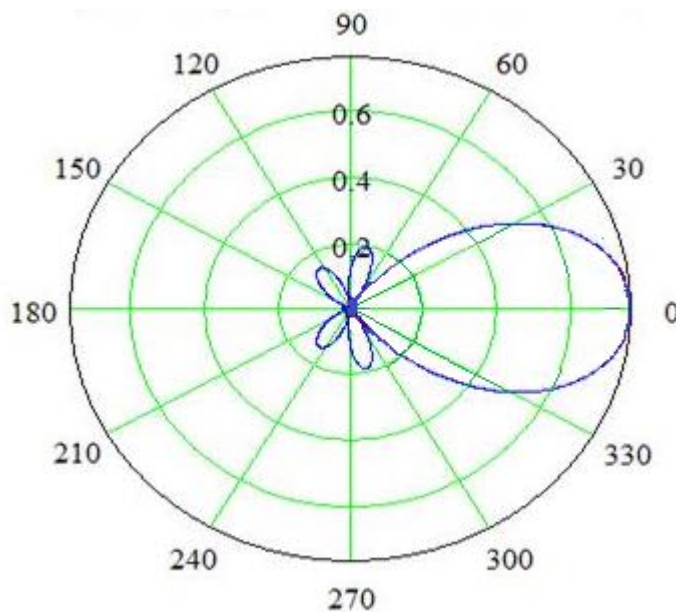


Рисунок 2.4. – ДС дзеркальної антени

Отже для визначення завадостійкості радіолінії в умовах дії активних перешкод (перешкодостійкості) достатньо згідно виразу (2.4) знайти значення відношення сигнал/шум, яке буде створюватися на вході приймача НПУ, як при дії загороджувальної, так і прицільної перешкод.

Як показник ефективності руйнування радіолінії корисної інформації будемо використовувати відношення

$$S_{\text{еф}} = \frac{q_{\text{min}}}{q_{\text{п}}}, \quad (2.6)$$

яке фактично показує на скільки зменшується ВСШ на вході приймача НПУ при постановці активної перешкоди порівняно з прийманням сигналу на фоні білого шуму.

Згідно розробленої методики можливо скласти певний алгоритм оцінки завадостійкості радіолінії передачі даних корисного навантаження, що наведений на рис. 2.5. Наведений алгоритм визначає послідовність дій з метою оцінки якості передавання цифрових даних як в умовах дії активної перешкоди, так і в умовах роботи без постановки перешкод. При цьому ефективність буде руйнування інформації, що передається з борту БПЛА звісно буде залежати від місця



Рисунок 2.5. – Алгоритм оцінки завадостійкості

розташування БПЛА та ПП по відношенню до НПУ, виду модуляції сигналу, параметрів передавача постановника перешкод та ін. Таким чином, боротьба з БПЛА включає в себе комплекс завдань з їх виявлення та розпізнавання, прийняття рішення по активному знищенню або порушенню функціонування БПЛА шляхом руйнування лінії передачі команд керування, навігаційних систем та передачі корисної інформації. При цьому одним із можливих варіантів придушення роботи БПЛА є створення перешкод, які порушують правильність функціонування радіолінії передачі корисної інформації. Використовуючи розроблений алгоритм можливо провести дослідження ефективності руйнування радіолінії корисної інформації БПЛА-НПУ.

РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ДАНИХ З БПЛА

3.1 Оцінка значення ВСШ на вході приймача цифрової радіолінії

Для оцінки можливості руйнування корисної інформації, що передається по радіолінії БЛА- НКУ. шляхом активної радіоелектронної протидії оберемо систему передачі даних “INDELA ATA-5800”, основні характеристики якої наведені у табл. 3.1 [18].

Таблиця 3.1 - Характеристики радіолінії БЛА-НКУ “INDELA ATA-5800”

Назва параметру	Розмірність	Значення параметру
Частотний діапазон	МГц	5200-5800
Коефіцієнт підсилення наземної антени	дБ	23
Дальність зв'язку, до	км	45
Швидкість передачі даних	Мбіт/с	40
Коефіцієнт підсилення бортової антени	дБ	7,5
Вихідна потужність бортового передавача, до	Вт	1

Перш за все визначимо як змінюється ВСШ для цієї системи передачі інформації при зміні дальності прямої видимості R між БЛА і НКУ. Будемо вважати, що передача цифрового потоку відбувається зі швидкістю 40Мбіт/с та модуляцією BPSK, 16QAM та 64QAM і $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,6$.

У визначеному діапазоні частот шумова температура приймача не буде перевищувати 500K [19]. Для визначення ВСШ без перешкод необхідно знайти потужність теплового шуму на вході приймача: $P_{\text{шо}} = N_0 \cdot \Delta f_c$.

Так як передача цифрового потоку відбуватиметься зі швидкістю 40Мбіт/с та модуляцією BPSK, то необхідну смугу пропускання приймача визначаємо за

наступною формулою $\Delta f_c = \frac{B}{\log_2 M}$ [9]. З урахуванням того, що $B = \frac{1}{\tau_{\text{оіма}}}$, а $M=2$, мінімальне значення смуги частот, що займатиметься корисним сигналом складе $\Delta f_c = 40 \text{ МГц}$. Тоді значення потужності шуму у смузі приймача НКУ, при модуляції BPSK, $P_{\text{ш0}} = 2,76 \cdot 10^{-13}$ Вт. Відомо, що у стандартній атмосфері на частоті 5 ГГц погонне послаблення сигналу складає 0,007дБ/км [20]. Тоді, враховуючи дані табл.3.1, за виразом (2.3) знайдемо значення потужності сигналу на вході приймача НКУ P_c та розрахуємо ВСШ, для різних дальностей R , які занесемо до табл.3.2. Також у табл.3.2 занесені дані для інших видів модуляції корисного сигналу із врахуванням того, що при переході до багаторівневої маніпуляції відбувається відповідне звуження спектру корисного сигналу [9].

Таблиця 3.2 – Зміна ВСШ при зміні дальності прямої видимості

R , м	P_c , Вт	q , дБ		
		BPSK	16QAM	64QAM
1000	$7,1 \cdot 10^{-9}$	44	50	52
5000	$2,8 \cdot 10^{-10}$	30	36	38
10000	$6,3 \cdot 10^{-11}$	24	30	32
25000	$9,9 \cdot 10^{-12}$	16	22	24
45000	$3,3 \cdot 10^{-12}$	10,7	16,7	18,5

Аналіз даних табл.3.2 показує, що мінімальне значення ВСШ відповідає максимальній дальності дії радіолінії. Отримані за результатами розрахунків ВСШ для всіх видів модуляції на максимальній дальності практично співпадають із

графічними даними, що наведені на рис.1.7, і забезпечують $P_{BER} = 10^{-6}$. Отже значення ВСШ для всіх видів модуляції для максимальної дальності дії радіолінії фактично являють собою значення Q_{min} , при яких забезпечується $P_{BER} = 10^{-6}$.

Визначимо яку потужність буде створювати на вході приймача НКУ постановник перешкод, що використовує як антену, що випромінює напівхвильовий вібратор, має ККД антенно-фідерного тракту $\eta_3 = 0,5$. Розрахунки проведемо для різних віддалень від НКУ та потужності передавача постановника перешкод 10 Вт. Для того, щоб скористатися виразом (2.5) необхідно з'ясувати які значення буде набувати коефіцієнт $K_{БП}$. Наприклад, якщо ПП знаходиться недалеко від площини руху БПЛА, то можна вважати, що напрямок приходу коливань перешкоди буде співпадати, як мінімум, з першою бічною пелюсткою діаграми спрямованості антени «INDELA-RM 5800», що наведена на рис. 3.1, і її рівень можна прийняти приблизно -7дБ, а прогалини між головною і бічною пелюстками складатимуть -10дБ [18].

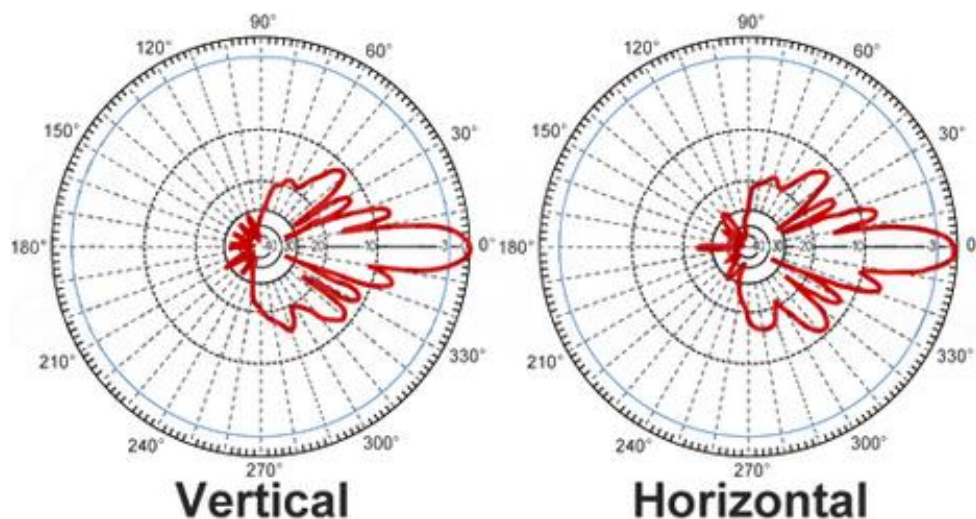


Рисунок 3.1 – Діаграма спрямованості антени «INDELA-RM 5800»

Результати розрахунків P_{nc} , для випадку потрапляння коливань перешкоди в прогалини між головною і бічною пелюстками діаграми спрямованості ($K_{\text{бл}} = 0,1$), занесемо до табл.3.3 Також табл.3.3 містить розрахунки ВСШ q_n залежно від відстані БПЛА – НКУ, що розраховані за виразом (2.4) для прицільної перешкоди ($m=1$) і для випадку використання BPSK модуляції. Аналіз табл. 3.2 показує, що для варіантів, де ВСШ менш ніж 3,4 рази якість передавання корисної інформації суттєво погіршується, бо це значення ВСШ фактично відповідає для BPSK модуляції $P_{\text{BER}} = 10^{-2}$ (див. рис.1.7). Ефективне руйнування корисної інформації для BPSK модуляції відбувається для випадків, коли БПЛА знаходиться від НКУ на відстанях, більших ніж віддалення ПП від НКУ. У той же час, навіть коли БПЛА знаходиться безпосередньо над ПП, відстань від БПЛА до НКУ буде завжди більшою ніж відстань від ПП до НКУ і тому буде відбуватися ефективне руйнування інформації ($q_n < 5,3$ дБ).

Таблиця 3.3 - ВСШ у разях при використанні прицільної перешкоди і BPSK модуляції

R_{nn} , м	P_{nc} , Вт	$R_{\text{БПЛА}}$, м				
		1000	5000	10000	25000	45000
1000	$2,1 \cdot 10^{-9}$	3,4	0,13	0,03	0,005	0,002
3000	$2,3 \cdot 10^{-10}$	30	1,23	0,3	0,05	0,014
5000	$8,2 \cdot 10^{-11}$	86	3,4	0,85	0,13	0,04

Якщо сигнал ПП буде потрапляти у першу бічну пелюстку діаграми спрямованості антени «INDELA-RM 5800», то результати, що наведені у табл.3.2 зменшаться у 2 рази. Якщо ж ПП буде працювати у режимі шумової

загороджувальної перешкоди ($m=0,1$), то для досягнення значень, що наведені у табл.3.2 доведеться збільшити потужність передавача до 100 Вт.

Як показали результати розрахунків для випадку $R_{nn}=R_{БПЛА}=1$ км, що наведені у табл.3.4, цієї потужності також цілком достатньо, навіть при використанні шумової загороджувальної перешкоди, щоб ефективно зруйнувати корисну інформацію у радіолінії з багаторівневою маніпуляцією. Збільшення потужності передавача ПП до 150 Вт зменшує значення ВСШ на вході приймача НКУ до значень, при яких для всіх видів маніпуляції $P_{BER} \leq 10^{-2}$ (див. рис.1.7).

Таблиця 3.4 - ВСШ при використанні загороджувальної перешкоди

Вид модуляції	BPSK		16QAM		64QAM	
$P_{вн}$, Вт	100	150	100	150	100	150
q_n , дБ	5,3	3,6	11,4	9,6	13	11,5

3.2 Розрахунок ефективності руйнування корисної інформації цифрової радіолінії

Отримаємо графічні залежності показника ефективності руйнування корисної інформації цифрової радіолінії при постановці загороджувальної активної перешкоди з використанням результатів попередніх розрахунків. Як показник ефективності руйнування радіолінії корисної інформації будемо використовувати відношення (2.6), яке фактично показує на скільки зменшується ВСШ на вході приймача НПУ при постановці активної перешкоди порівняно з прийманням сигналу на фоні білого шуму. У розрахунках використаємо ті ж самі значення, що і раніше, але потужність випромінюваних передавальною антеною коливань постановника перешкод візьмемо 150 Вт. Залежність ефективності придушення корисної інформації від зміни місцезнаходження БЛА та НПУ при коефіцієнті бокової пелюстки $K_{БЛ}=0,1$ для модуляції BPSK наведена на рис. 3.2.

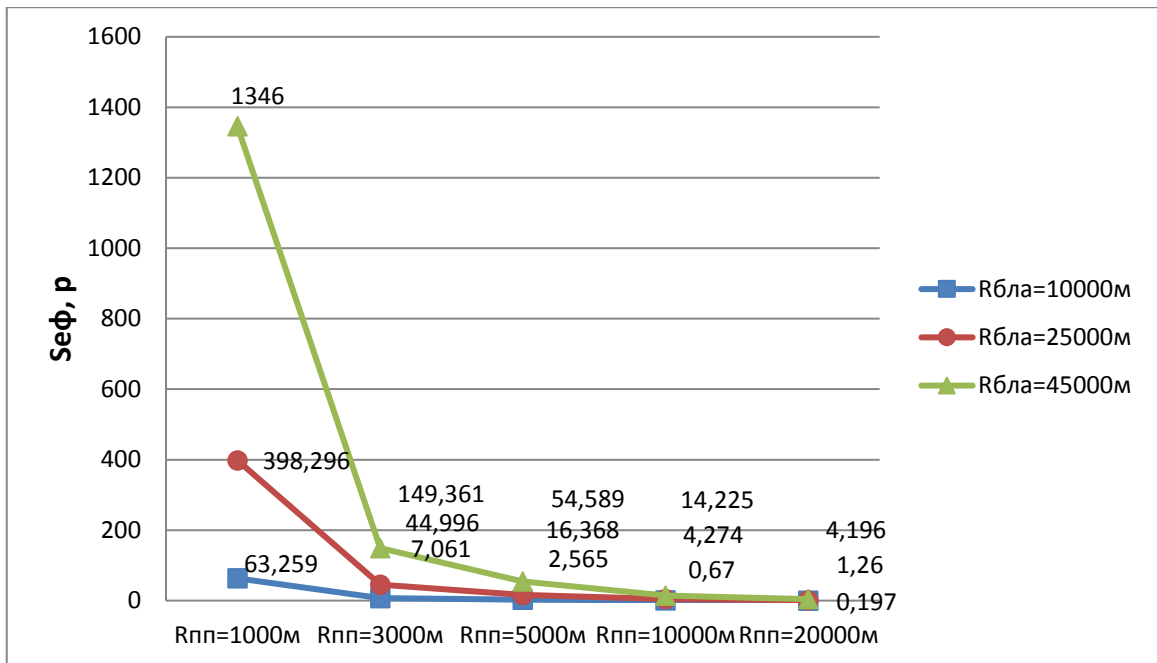


Рисунок 3.2. - Залежність ефективності придушення корисної інформації від зміни місцезнаходження БПЛА та НПУ для модуляції BPSK

Залежність ефективності придушення корисної інформації від зміни місцезнаходження БЛА та НПУ при коефіцієнті бокової пелюстки $K_{БЛ}=0,1$ для модуляції 16QAM наведена на рис. 3.3.

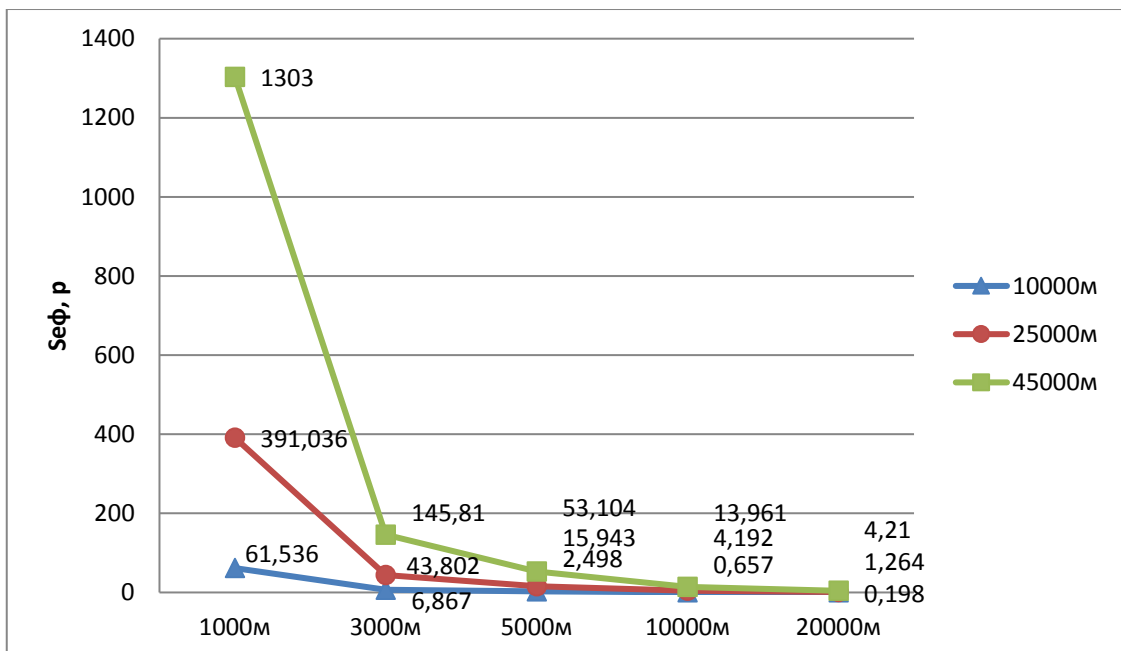


Рисунок 3.3. - Залежність ефективності придушення корисної інформації від зміни місцезнаходження БЛА та НПУ для модуляції 16QAM

Залежність ефективності придушення корисної інформації від зміни місцезнаходження БЛА та НПУ при коефіцієнті бокової пелюстки $K_{БЛ}=0,1$ для модуляції 64QAM наведена на рис. 3.4.

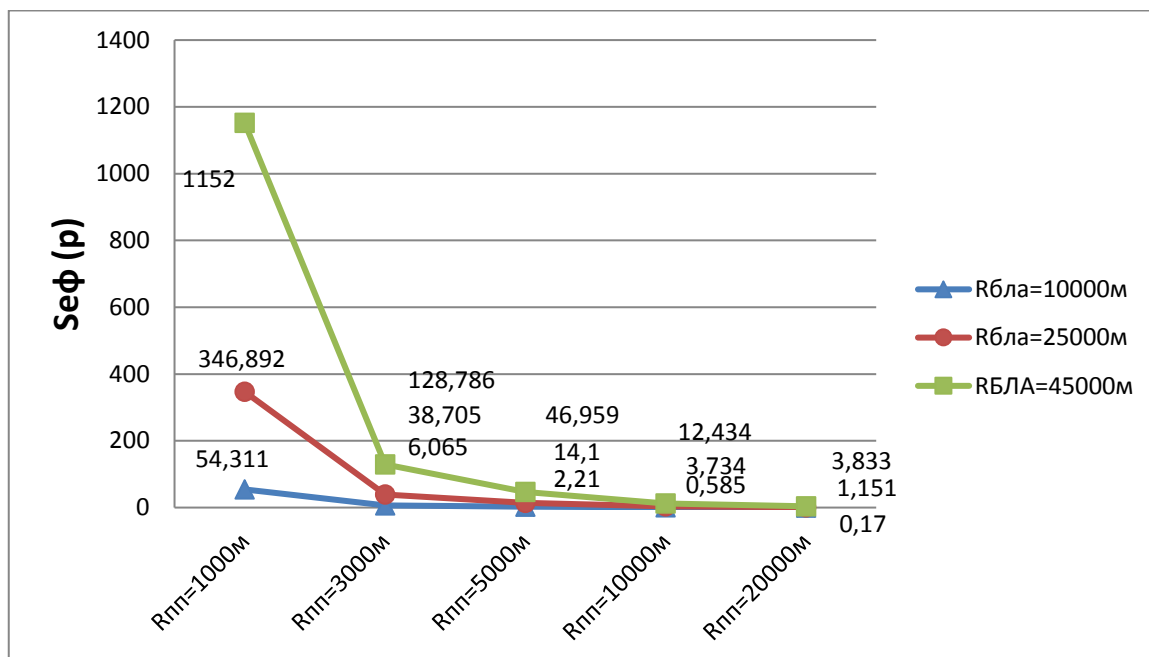


Рисунок 3.4. - Залежність ефективності придушення корисної інформації від зміни місцезнаходження БЛА та НПУ для модуляції 64QAM

Аналіз наведених даних показує, що шумова загороджувальна перешкода забезпечує ефективне руйнування корисної інформації, яка передається з борту БПЛА по типовій радіолінії з багаторівневою маніпуляцією, при потужності передавача ПП 150 Вт і ненапрямленій антені. Навіть для загороджувальної перешкоди можливо забезпечити достатньо ефективне руйнування корисної інформації, що передається по радіолінії з борту БПЛА при різних видах маніпуляції цифрового сигналу. При звуженні смуги пропускання приймального пристрою ефективність придушення має тенденцію к зменшенню також.

3.3 Аналіз перспективних напрямів удосконалення цифрових радіоліній БПЛА

Кількісні і якісні зміни в засобах радіотехнічної розвідки і радіоелектронного придушення (РТР і РЕП) провідних країн світу в останні кілька десятиліть призвели до ситуації, коли засоби радіоелектронної боротьби за ефективністю своєї роботи перевершують ефективність засобів зв'язку, що створює суттєвий вплив на роботу

останніх, навіть за умови використання сучасних технологій, новітньої елементної бази і впровадження нових тактичних рішень щодо умов їх експлуатації [21-23].

Подібна ситуація дозволяє стверджувати, що пріоритетним шляхом покращення ефективності роботи засобів зв'язку є підвищення їх завадостійкості і прихованості факту їх роботи.

Завадостійкість радіоелектронного комплексу характеризує можливість його ефективної роботи при одночасному веденні супротивником радіоелектронної розвідки і створенню перешкод. Під прихованістю роботи радіоелектронної системи розуміється здатність протистояти засобам радіоелектронної розвідки супротивника, тим самим ускладнити йому проведення комплексу заходів щодо втручання в процес роботи радіосистеми.

Відомими є частотний, структурний, часовий, амплітудний і просторовий методи підвищення прихованості. Сутність частотного методу зводиться до перестройки приймально-передавальних пристроїв у процесі їх роботи і частотному маскуванні радіосигналів, що випромінюються. Частотний метод направлений на ускладнення визначення супротивником робочої частоти радіоелектронного пристрою з необхідною вірогідністю чи її вимірювання із заданою точністю. Це не дозволяє супротивнику створювати завади прицільні по цій частоті, причому, чим більший діапазон частот сканування, тим менш ефективними будуть завади.

Збільшення швидкодії комплексів РТР і РЕП, збільшення потужності та ширини смуги перешкод дозволяє ефективно боротися з більшістю вузькосмугових засобів зв'язку навіть за умови використання псевдовипадкової зміни послідовності робочих частот і використання новітньої швидкодіючої елементної бази і схемних рішень для пришвидшення зміни частоти.

Структурний метод підвищення прихованості ґрунтується на використанні квазівипадкових сигналів. Сутність цього методу полягає в тому, що випромінювальний пристрій формує шумоподібний сигнал або кодові групи імпульсів, закон обробки який супротивнику не відомий. Типовим представником таких кодових груп є М-послідовність, коди Баркера і інші типи складних сигналів,

що забезпечують принцип стиснення. В найпростіших випадках структурна прихованість досягається тим, що до послідовності імпульсів, що відображають повідомлення, що передаються, додаються імпульси, які супротивнику представляються хаотичними, і, в той же час, відомі для приймальної установки радіоелектронного пристрою. У супротивника виникають проблеми по визначенню виду модуляції, кодів, що використовуються і т.д., чим знижується можливість створення ефективних перешкод.

Часовий метод підвищення прихованості ґрунтується на зменшенні тривалості і частоти повторення радіосигналу, що випромінюється. Якщо за час підготовки радіотехнічних пристроїв до роботи і його функціонування радіосигнали не випромінюються, то система, що містить лише приймальну установку, є практично прихованою.

Амплітудний метод підвищення прихованості передбачає зниження потужності передавача системи зв'язку для того, щоб потужність сигналу на вході засобу РТР була меншою його реальної чутливості. Для вузько смугових сигналів цей метод є практично недоцільним, оскільки значно знижує завадостійкість системи зв'язку. Разом з тим, використання широкосмугових шумоподібних сигналів і кореляційних методів позбавлене цих недоліків.

Просторова прихованість визначається діаграмами спрямованості антенних систем, які використовуються в радіоелектронному пристрої. Відповідно, чим вужча діаграма направленості антен, що використовується і нижчий рівень бічних пелюстків, тим вища їх прихованість. Однак використання антен з вузькими діаграмами направленості часто є недоцільним при комунікації з великою кількістю абонентів і при постійній зміні положення приймача або передавача.

У цілому, збільшення завадостійкості радіоелектронних засобів зв'язку може досягатись багатьма методами, вибір яких полягає як в особливостях функціонування систем зв'язку, так і в інформації про наявні засоби протидії у супротивника. Завадостійкість досягається запобіганням перевантаження приймачів, компенсацією перешкод, первинною, вторинною і функціональною

селекцією, адаптацією, комплексним використанням інформації і використанням сигналів завад в кореляційних системах.

Запобігання перевантаження приймачів досягається використанням швидкодіючих систем автоматичного регулювання рівнів і підсилювачів з лінійно-логарифмічними характеристиками.

Компенсація завад поділяється на три основні методи: компенсація завад за допомогою допоміжних (компенсаційних) радіоприймачів, черезперіодна компенсація і компенсація завад за використанням кореляційних методів. Саме використання кореляційних методів у поєднанні з інтеграторами і лініями затримки дозволяють значно зменшити ефективність широкосмугових завад. При використанні звичайного вузькосмугового радіосигналу, коли передача відбувається на одній певній частоті, а точніше, у вузькій смузі радіо-спектра, процес прийому сигналу ускладнюють різні взаємні перешкоди між вузькосмуговими сигналами великої потужності, переданими близько один від одного або на близьких частотах. Зокрема, вузькосмуговий сигнал може бути легко заглушений передавачем достатньої потужності, налаштованим на ту ж частоту.

Саме ця незахищеність від перешкод звичайного радіосигналу призводить до необхідності використання широкосмугового сигналу, або шумоподібного сигналу (ШСС), що полягає в розширенні спектру сигналу, що випромінюється. Ідея ШСС полягає в тому, що для передачі інформації використовується значно більш широка смуга частот, ніж це потрібно при звичайній (у вузькому частотному каналі) передачі. Системи зв'язку на основі широкосмугових шумоподібних сигналів дозволяють використовувати декілька незалежних каналів зв'язку в одній і тій же смузі частот. Для цього в кожному каналі зв'язку вузькосмуговий сигнал, що несе інформацію змішується з широкосмуговим псевдовипадковим сигналом і випромінюється в ефір. За допомогою набору з незалежних (ортогональних) сигналів можна отримати таку ж кількість каналів, що працюють у смузі частот ШСС без взаємних завад. На приймальній стороні інформаційний сигнал відділяється від псевдовипадкового і передається споживачу інформації.

Існують декілька методів розширення спектру сигналів, які розрізняються між собою принципами використання широкої смуги частот - метод прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS), метод частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS), метод розширення спектру лінійно частотно-модульованими сигналами (Chirp Spread Spectrum - CSS), метод часових стрибків (Time Hopping - TH) [5,9].

Метод прямої послідовності полягає в розділенні: смуга частот ділиться на деяке число підканалів (наприклад за стандартом 802.11 цих каналів 11). Кожен переданий біт інформації перетворюється, за заздалегідь зафіксованим алгоритмом, в послідовність з 11 біт, а ці 11 біт передаються одночасно і паралельно, використовуючи всі 11 підканалів. При прийомі, отримана послідовність біт декодується з використанням того ж алгоритму, що і при її кодуванні. Інша пара приймач-передавач може використовувати інший алгоритм кодування-декодування, і таких різних алгоритмів може бути дуже багато. Перший очевидний результат застосування цього методу – захист переданої інформації від підслуховування ("чужий" DSSS-приймач використовує інший алгоритм і не зможе декодувати інформацію не від свого передавача). Але більш важливим є те, що завдяки 11-кратній надмірності передачі можна обійтися сигналом з дуже маленькою потужністю (в порівнянні з рівнем потужності сигналу при використанні звичайної вузькосмугової технології), не збільшуючи при цьому розмірів антен. При цьому дуже зменшується відношення рівня переданого сигналу до рівня шуму, (тобто випадкових або навмисних перешкод), так що передається сигнал вже ніби невиразний в загальному шумі. Але завдяки його 11-кратній надмірності приймаючий пристрій все ж зуміє його розпізнати. Завдяки дуже низькому рівню потужності свого сигналу сигнали практично не створюють перешкод вузькосмуговим радіопристроєм, оскільки останні приймають широкосмуговий сигнал за шум в межах допустимого.

При кодуванні за методом частотних стрибків (FHSS) вся відведена для передач смуга частот підрозділяється на деяку кількість підканалів. Кожен передавач в кожен момент використовує тільки один з цих підканалів, регулярно

перескакуючи з одного підканалу на інший. Ці стрибки відбуваються синхронно на передавачі і приймачі в заздалегідь зафіксованій псевдовипадковій послідовності. Інша пара передавач-приймач буде використовувати й іншу послідовність перемикаць частот, задану незалежно від першої. В одній смузі частот і на одній території прямої видимості таких послідовностей може бути багато. При зростанні кількості одночасних передач зростає і ймовірність колізій.

Метод частотних стрибків, так само як і метод прямої послідовності, забезпечує конфіденційність і перешкодозахищеність передач. Перешкодозахищеність забезпечується тим, що, якщо на якому-небудь з підканалів переданий пакет не зміг бути прийнятий, то приймач повідомляє про це, і передача цього пакету повторюється на одному з наступних (в послідовності стрибків) підканалів.

Метод розширення спектру лінійно-частотно-модульованими (ЛЧМ) сигналами (CSS) полягає у використанні в ролі несучої сигналу з частотою, що змінюється за певним лінійним законом. Використання таких коливань дозволяє позбавитись багатьох недоліків вузькосмугових сигналів (селективні завмирання, низька стійкість до завад) і відкриває широкі можливості до використання одного частотного діапазону багатьма абонентами без взаємного перешкоджання якості зв'язку. Прихованість і завадостійкість систем передачі інформації з ЛЧМ сигналами значно підвищується використанням псевдовипадкового закону зміни початкової частоти ЛЧМ сигналу і великого об'єму ансамблів ЛЧМ сигналів із заданими взаємкореляційними властивостями.

Метод часових стрибків (ТН) полягає у використанні широтно-імпульсної модуляції, в якому період і скважність імпульсів змінюються по псевдовипадковій послідовності. Тим самим досягається висока завадостійкість і прихованість факту передачі. Зазвичай метод не використовується поодиночі, а у комбінації з одним із вищеописаних.

Використання криптографії і швидкодіючих мікросхем для DSSS і FHSS дозволяють знизити вірогідність дешифрування супротивником змісту повідомлення, однак вони не дозволяють уникнути можливості виявлення факту

передачі такого повідомлення. А це в сучасних збройних конфліктах стає чи не пріоритетною задачею систем зв'язку, що працюють на передньому краю і за лінією зіткнення. Використання ЛЧМ сигналів в системах зв'язку дозволяє виконувати передачу повідомлень з потужністю значно нижчою за рівень шумів, що у поєднанні з сучасними методами криптографії піднімає такі системи на принципово новий рівень захищеності.

У даному розділі було проведено ряд розрахунків, щодо знаходження ВСШ без перешкоди для системи передачі корисної інформації INDELA-5800 для різних видів модуляції. Проведена оцінка можливості руйнування корисної інформації, що передається по радіолінії БПЛА – НКУ у частотному діапазоні 5 ГГц шляхом активної радіоелектронної протидії та отримані показники ефективності придушення радіолінії корисної інформації БПЛА. Ефективність придушення має різне значення для різних видів модуляції, при використанні різних типів перешкод та при різних дальностях місцезнаходження БПЛА та постановника перешкоди від НПУ. Перспективним методом підвищення завадо захищеності радіолінії передачі корисної інформації БПЛА-НПУ можливо вважати використання широкосмугових сигналів.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота спрямована на дослідження завадостійкості радіолінії передачі цифрових даних з борту літального апарату. Основною метою досліджень була оцінка якісних показників передачі цифрових даних з борту БПЛА. Як метод боротьби з БПЛА розглядалась можливість порушенню функціонування БПЛА шляхом руйнування лінії передачі корисної інформації.

У роботі запропонована методика розрахунку показників завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації та проведена оцінка завадостійкості радіолінії передачі спеціальної інформації типового БПЛА для різних відстаней від наземного пункту управління із використанням різних видів маніпуляції при передачі цифрових даних.

Оцінка завадостійкості передачі цифрових даних з БПЛА на НПУ була проведена як для умов передавання даних на фоні білого шуму, так і в умовах постановки активної перешкоди. При цьому, як показник ефективності придушення радіолінії було запропоновано використовувати погіршення відношення сигнал/шум, порівняно із значенням, яке відповідає забезпеченню припустимої похибки передачі біта інформації, при певному виді маніпуляції несучого коливання бортового передавача цифровим сигналом.

Для оцінки завадостійкості радіолінії передачі цифрових даних з борту літального апарату та можливості руйнування корисної інформації, що передається по радіолінії БПЛА- НКУ шляхом активної радіоелектронної протидії було обрано систему передачі даних “INDELA ATA-5800”. Проведена оцінка можливості руйнування корисної інформації, що передається по радіолінії БПЛА– НКУ у частотному діапазоні 5 ГГц шляхом активної радіоелектронної протидії та отримані показники ефективності придушення радіолінії корисної інформації БПЛА. Ефективність придушення має різне значення для різних видів модуляції, при використанні різних типів перешкод та при різних дальностях місцезнаходження БПЛА та постановника перешкоди від НПУ.

За результатами аналізу проведених досліджень було зроблено висновок, що загороджувальна перешкода, здатна забезпечити достатньо ефективне руйнування корисної інформації, що передається по радіолінії з борту БПЛА при різних видах маніпуляції цифрового сигналу. При звуженні смуги пропускання приймального пристрою ефективність придушення зменшується.

Перспективним методом підвищення завадо захищеності радіолінії передачі корисної інформації БПЛА-НПУ можливо вважати використання широкосмугових сигналів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сальник Ю.П. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ. – Львів : – 2002. – Вип.1 Аналіз можливостей тактичних безпілотних авіаційних комплексів. - 336с.
2. Даник Ю.Г. 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.
3. Пархоменко А. В. Артилерійська розвідка. Ч. І. Пристрої артилерійської розвідки / А. В. Пархоменко. – Пенза : ПАИИ, 2010. – 332 с.
4. Долуханов М.П. Поширення радіохвиль / М. П. Долуханов. - М .: Связь, 1972. – 336 с.
5. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи і практичне застосування, Изд. 2-е, випр .: пер. з англ. .: Видавничий дім «Вільямс», 2003. - 1104 с.
6. Окунєв, Ю. Б. Цифрова передача інформації фазомодулюючими сигналами / Ю. Б. Окунєв. - М .: Радио и связь, 1991. - 296 с.
7. ДСТУ 3651.1-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць та позасистемні одиниці. Основні поняття, назви та позначення.
8. Казарінов, Ю.М. Радіотехнічні системи. Підручник для вузів за фахом "Радіотехніка" /Ю.М.Казарінов и др.:1990.-496с.
9. Слободянюк М. В. Базові принципи цифрового зв'язку / М. В. Слободянюк. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 236 с.
10. Скрипник Ю. О., Манойлов В. П., Яненко О. П. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: Навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 374 с
11. Данилов Д. Мікрохвильові технології / Д. Данилов. – Київ: Техніка, 2019. – 310 с.
12. Савельєв С. І. Радіоантени: теорія і практика. – Харків: Основа, 2012. – 368 с.
13. Тимощук О. В. Основи теорії антен: навчальний посібник. – Одеса: Чорномор'я, 2014. – 276 с.

14. Мартиненко І. Г. Антенні системи для цифрового телебачення. – Київ: Техніка, 2018. – 310 с.
15. Литвиненко П. М. Радіохвильові антени: принципи та застосування. – Черкаси: Видавництво ЧНУ, 2013. – 390 с.
16. «Дослідження завадостійкості радіолінії передачі цифрових даних з борту літального апарату». Тези III Всеукраїнської науково-технічної конференції.
17. AR5000A [Електронний ресурс] / Режим доступу : https://www.rigpix.com/aor/ar5000_manual.pdf.
18. Грищенко В. В. Супутникові системи зв'язку: теорія та практика. – Київ: Політехніка, 2011. – 350 с.
19. Мартиненко І. Г. Техніка супутникових систем зв'язку. – Одеса: Чорномор'я, 2013. – 340 с.
20. Бондаренко С. І. Радіотехнічні системи супутникового зв'язку. – Вінниця: Універсум, 2014. – 295 с.
21. Застосування безпілотних літальних апаратів у воєнних конфліктах сучасності : моногр. / Ю. К. Зіатдінов, М. В. Куклінський, С. П. Мосов, А. Л. Фещенко, О. О. Горошко; ред.: С. П. Мосов. - К. : Видавн. дім "Києво-Могилян.акад.", 2013. - 247 с.
22. Ferreira A. C. R., Santos F. F. "Trends and Applications of Unmanned Aerial Vehicles." Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2018.
23. Теорія і техніка протидії безпілотним засобам повітряного нападу. Застосування та перспективи розвитку. Виявлення малопомітних засобів повітряного нападу / В.І. Ткаченко, Ю.Г. Даник, Г.А. Дробаха, В.І. Карпенко, Р.Е. Пащенко, Є.Б. Смірнов. – Х.: ХВУ, 2002. – 220с.