

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Метод підвищення ефективності супутникового радіоелектронного
подавлення даних телеметрії у безпілотних об'єктах

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи РРМ-61
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Гунчак І.Р.</u> (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Яськів В.І.</u> (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Хвостівська Л.В.</u> (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Дунець В.Л.</u> (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u>Хвостівський М.О.</u> (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » грудня

2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Гунчаку Івану Романовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод підвищення ефективності супутникового радіоелектронного подавлення даних телеметрії у безпілотних об'єктах

Керівник роботи Яськів Володимир Іванович, д.т.н., професор кафедри РТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 6 » грудня 2022 року № 4/7-989

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи частотний діапазон (3,2...4,8) GHz, (10,7...12,75...18,5) GHz, дальність виявлення БПЛА ≤ 70 км, висота ≥ 10 км, ідентифікація приналежності ≈ 50 км, смуга частот (канальна) – (1-5 MHz), рівень завад $\leq - (130...140)$ dB

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина

2. Основна частина

3. Науково-дослідна частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Актуальність теми

2. Мета і завдання роботи

3. Узагальнена класифікація БПЛА військового призначення

4. Супутниковий зв'язок для БПЛА

5. Організація управління БПЛА з використанням супутника

6. Глобальні супутникові навігаційні системи

7. Структура методу протидії БПЛА, які працюють з ШСЗ

8. Результати оцінки впливу дестабілізуючих факторів на роботу комплексу протидії БПЛА

9. Наукова новизна одержаних результатів

10. Загальні висновки

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод підвищення ефективності супутникового радіоелектронного подавлення даних телеметрії у безпілотних об'єктах» // Кваліфікаційна робота // Гунчак Іван Романович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РРм-61 // Тернопіль, 2022 // с. – 92, рис. – 47, табл. – 18, додат. – 1, бібліогр. – 50.

Ключові слова: БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ЧАСТОТНІ ДІАПАЗОНИ, РАДІОЕЛЕКТРОННЕ ПОДАВЛЕННЯ, МОДУЛЯЦІЯ, АТМОСФЕРНІ ВТРАТИ.

У роботі проаналізовано та узагальнено тактико-технічні характеристики БПЛА і комплексів радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку з БПЛА. Здійснено детальний аналіз БПЛА, які працюють з штучними супутниками Землі.

Проаналізовано характеристики супутникових каналів зв'язку з БПЛА: частотні діапазони, а також види модуляції для утворення каналів радіоуправління, навігації, передачі даних телеметрії.

Запропоновано структуру методу протидії безпілотним літальними апаратам.

Розроблено програмний код для оцінки впливу дестабілізуючих факторів на комплекс протидії БПЛА. Досліджено втрати сигналу при проходженні крізь дощ, сніг, туман, хмари, атмосферні гази, а також втрати розповсюдження для частотного діапазону 1-50 ГГц.

ANNOTATION

Theme of qualification work: «A method of increasing the efficiency of satellite radio-electronic suppression of telemetry data in unmanned objects» // Qualification work // Hunchak Ivan // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, group RRm-61 // Ternopil, 2022 // p. – 92, fig. – 47, tab. – 18, Add – 1, Ref. – 50.

Key words: UNMANNED AERIAL VEHICLE, FREQUENCY RANGE, RADIO ELECTRONIC SUPPRESSION, MODULATION, ATMOSPHERIC ATTENUATION.

The work analyzed and summarized the tactical and technical characteristic of UAVs and complexes of radio-electronic suppression of satellite communication channels with UAVs. A detailed analysis of UAVs that work with artificial Earth satellites was carried out.

The characteristics of satellite communication channels with UAVs are analyzed: frequency ranges, as well as types of modulation for the formation of radio control channels, navigation, telemetry data transmission.

The structure of the method of combating unmanned aerial vehicles is proposed.

A software code was developed to assess the impact of destabilizing factors on the anti-UAV complex. The signal attenuation when passing through rain, snow, fog, clouds, atmospheric gases, as well as propagation attenuation for the frequency range of 1-50 GHz were studied.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1. Класифікація БПЛА військового призначення у відповідності до висоти, ваги та дальності польоту	11
1.2. Аналіз БПЛА, які працюють з ШСЗ.....	18
1.2.1. RQ-4 Global Hawk.....	18
1.2.2. MQ-9 Reaper.....	20
1.3. Коротка характеристика бортового обладнання БПЛА	22
1.4. Методи управління БПЛА.....	23
1.4.1. Організація управління БПЛА за допомогою супутника ретранслятора..	27
1.5. Огляд засобів радіоелектронного подавлення каналів радіоуправління, телеметрії та навігації БПЛА	28
1.5.1 Зарубіжні комплекси боротьби з БПЛА	29
1.5.2. Українські розробки засобів РЕБ/РЕП БПЛА.....	31
1.5.3. Узагальнення ТТХ засобів РЕБ/РЕП БПЛА.....	34
1.6. Висновки до розділу 1	36
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА	37
2.1. Частотні діапазони каналів радіоуправління, телеметрії та передачі даних БПЛА	37
2.1.1. Варіант зв'язку між БПЛА та НСУ по прямому та супутниковому радіоканалах з використанням Ku-діапазону	41
2.2. Види використовуваної модуляції.....	44
2.2.1. Схеми цифрової модуляції	44
2.2.2. Двійкова фазова модуляція	46
2.2.3. Квадратурна фазова модуляція.....	47
2.3 Радіоелектронне подавлення супутникової системи зв'язку з БПЛА.....	49
2.3.1. Радіоелектронне подавлення висхідної та низхідної ліній зв'язку.....	49
2.3.2. Комплексний метод протидії БПЛА	51
2.3.3. Навмисні активні завади.....	52

	7
2.3.4. Хаотична імпульсна завада	53
2.4. Дестабілізуючі фактори, які впливають на роботу комплексу протидії БПЛА	56
2.4.1. Втрати у спокійній атмосфері	57
2.4.2. Втрати через неузгодженість поляризації антен.....	57
2.4.3. Втрати через неточність наведення антен	57
2.4.4. Розрахунок втрат у дощі.....	58
2.5. Висновки до розділу 2	61
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	62
3.1. Оцінка впливу дестабілізуючих факторів на роботу комплексу протидії БПЛА	62
3.2. Втрати сигналу у дощі	62
3.2.1. Втрати сигналу в дощі за моделлю ITU-R.....	62
3.2.2. Втрати сигналу в дощі за моделлю Crane.....	64
3.3. Втрати сигналу в атмосферних газах	65
3.4. Втрати сигналу в тумані та хмарах	67
3.5. Втрати сигналу при розповсюдженні крізь сніг	69
3.6. Втрати вільного простору	70
3.7 Висновки до розділу 3	71
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	72
4.1. Охорона праці	72
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	75
4.3. Висновки до розділу 4	80
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ.....	88
ДОДАТОК А. Копія тези конференції.....	89

ВСТУП

Актуальність. Один із найактуальніших напрямів ведення військових дій це – використання дронів, які виконують радіомоніторинг, радіо- та оптичну розвідки, радіоподавлення систем зв'язку і передачі даних, проведення кібератак на інфраструктуру, знищення техніки та живої сили, дистанційне зондування великих територій противника з висоти понад 10 – 20 км.

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів та їх застосування у військових конфліктах, зокрема у війні в Україні, ставить завдання ефективної протидії їм. Тактико-технічні характеристики сучасних БПЛА, такі як висота та дальність польоту, а також використання для управління БПЛА супутникових систем зв'язку, унеможливають ефективну протидію традиційними комплексами протиповітряної оборони, тому постає задача радіоелектронного подавлення каналів радіоуправління, передачі даних телеметрії та супутникових навігаційних систем.

Враховуючи статистичні дані з попередніх війн, військових конфліктів та війну з росією в Україні, можна констатувати, що боротьба з дронами (їхня нейтралізація) є теж надважливим аспектом. Розвиток і удосконалення технологій створення дронів та систем радіоелектронної боротьби і подавлення безпілотних систем відбувається паралельними шляхами.

Метою дослідження є розробка методу підвищення ефективності радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку з безпілотними літальними апаратами.

Завдання дослідження:

- аналіз існуючих БПЛА військового призначення та бойових комплексів радіоелектронного подавлення каналів управління, навігації та телеметрії.
- здійснити детальний аналіз БПЛА, які працюють з штучними супутниками Землі (ШСЗ).

– провести аналіз частотних діапазонів та типів модуляції, які використовуються для утворення каналів радіоуправління, навігації та передачі даних телеметрії.

– розробити метод підвищення ефективності радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку з БПЛА.

– розробити засіб(код програми) для оцінки впливу дестабілізуючих факторів на роботу комплексу протидії БПЛА.

– здійснити дослідження втрат сигналу при проходженні крізь дощ, сніг, туман, атмосферні гази.

Об'єкт дослідження. Процес розробки методу підвищення ефективності радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку БПЛА.

Предмет дослідження. Супутниковий канал зв'язку з безпілотним літальним апаратом.

Наукова новизна отриманих результатів. Одержані результати на основі аналізу та досліджень, які становлять наукову новизну, під час виконання кваліфікаційної роботи, а саме:

– класифікація та аналіз безпілотних літальних апаратів військового призначення, які розроблені та експлуатуються в провідних країнах світу;

– аналіз засобів радіоелектронної боротьби з БПЛА та узагальнення їх тактико-технічних характеристик;

– аналіз частотних діапазонів та типів модуляції, які використовуються для утворення каналів радіоуправління, навігації та передачі даних телеметрії БПЛА;

– розроблено структуру методу підвищення ефективності радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку БПЛА;

– розроблено засіб оцінки втрат сигналу при проходженні крізь дощ, сніг, туман, хмари, атмосферні гази.

Практичне значення одержаних результатів. Результати кваліфікаційної роботи, можна використати при проектуванні систем

радіоелектронного подавлення вузлів керування безпілотними літальними апаратами.

Публікації. Результати дослідження апробовані та оприлюднені на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ».

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Класифікація БПЛА військового призначення у відповідності до ваги, висоти та дальності польоту.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – літальний апарат літакового або вертолітного типу без екіпажу на борту, політ якого здійснюється або за задалегідь закладеною траєкторією, або шляхом віддаленого управління каналами зв'язку [1].

При розгляді завдання протидії БПЛА слід класифікувати їх за масогабаритними характеристиками, висотою польоту, радіусом дії, а також за застосуванням. Класифікація БПЛА представлена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Класифікація БПЛА військового призначення

Клас БПЛА	Категорія	Позначення	Назва	Взлітна маса, кг	Радіус дії, км	Висота, км	Час польоту, год
Малі	I	η	Нано	до 0,25	до 1	0,1	<1
		μ	Мікро	до 5	до 10	3	1
		Mini	Міні	до 25	10	3	<4
Легкі	II	CR	Ближньої дії класу 1	25-50	25-70	3	2-4
			Ближньої дії класу 2	50-150	50-100	3	<6
Середні	III	SR	Малої дальності	до 200	до 150	4	6-8
		MR	Середньої дальності	до 500	200	5	10-12
	IV	MRE	Середньої дальності з більшою тривалістю польоту	500	500	8	10-18
		LADP	Маловисотний великої дальності	до 250	>250	до 4	1,5-2

Важкі	V	LALE	Маловисотний великої дальності і тривалості польоту	до 250	>500	4	18
	VI	MALE	Середньовисотний великої дальності і тривалості польоту	до 1000	>1000	8	24
	VII	HALE	Висотний великої дальності і тривалості польоту	до 2500	>4000	20	>24
Бойові	VII	UCAV	Безпілотні ударні	>1000	>500	12	1,5-2

Проаналізуємо технічні характеристики БПЛА військового призначення згідно класифікації наведеної у табл. 1.1, які розроблені та взяті на експлуатацію у провідних країнах світу.

Black Hornet (рис.1.1) – військовий мікро безпілотний літальний апарат, розроблений норвежською компанією «Prox Dynamics».

Чорний Шершень здатний виконувати розвідувальні місії, виконувати спостереження та розпізнавальну допомогу збройним силам у важливих операціях. Міні-дрон забезпечує доступ до недоступних місць і надає ситуаційну обстановку на полі бою [2].



Рис. 1.1. Black Hornet Nano

Технічні характеристики Black Hornet Nano приведено у табл. 1.2.

ТТХ Black Hornet Nano

Довжина, м	0,1
Діаметр несучого гвинта, м	0,06
Висота, м	0,025
Власна вага, кг	0,011
Крейсерська швидкість, км/год	11
Максимальний радіус дії, км	2,5
Практичний радіус дії, км	1000
Максимальна висота польоту, м	250
Супутникова навігаційна система	GPS, GPS Navstar

Система автоматичного польоту, встановлена на Чорному Шершні, забезпечує управління у двох режимах. Безпілотником можна управляти безпосередньо або запрограмувати на проходження заздалегідь визначеного шляху за допомогою системи GPS. При прямій видимості управління здійснюється в межах 1000 м [3].

Компанія Elbit розробила мініатюрні БПЛА Skylark, транспортну систему, призначену для тактичного спостереження на близькій відстані та розвідки, коригування артилерійського вогню, а також захисту сил і безпеки периметра [4].



Рис. 1.2. Запуск БПЛА Skylark 1LE “з руки”

Нова конфігурація Skylark 1LE (рис. 1.2) пропонує багато покращень порівняно з оригінальною Skylark, насамперед на 50% збільшену тривалість польоту 3 години, робочу висоту 4,5 км і розширений радіус дії до 15 км, (50 – 100% збільшення в порівнянні з оригінальною моделлю).

Розмах крила збільшився на 70 см до 2,9 метра, а максимальна загальна злітна маса зросла на 600 грамів з 6,1 кг.

Технічні характеристики Skylark 1LE представлено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

ТТХ Skylark 1LE

Довжина, м	2,2
Розмах крил, м	2,9
Взлітна маса, кг	6,5
Крейсерська швидкість, км/год	92
Максимальний радіус дії, км	30
Практичний радіус дії, км	15
Тривалість польоту, год	3
Максимальна висота польоту, м	5000
Супутникова навігаційна система	GPS, GPS Navstar

У той час БПЛА є простим в експлуатації, оскільки він керується автономно протягом місії (навіть на місцевості, де подавлено GPS), Elbit System пропонує додатковий інтегрований відео симулятор для покращення навчання, що дозволяє операторам краще розуміти та планувати місію на основі реалістичних переглядів очікуваної мети. Інші додаткові удосконалення включають допоміжну консоль керування, якою керуватиме командна група батальйону.

Scan Eagle UAS (рис.1.3.) – це портативна система, яка складається з чотирьох літальних апаратів або ЛА, наземної станції управління, віддаленого відеотерміналу та системи запуску та відновлення, відомої як система Skyhook [5].



Рис. 1.3. БПЛА Scan Eagle, посадочно-пускова установка Skyhook і наземна станція управління

Двоє спеціально навчених операторів керують БПЛА Scan Eagle разом із двома додатковими працівниками технічного обслуговування. Система запускається за допомогою катапульти та витягується за допомогою системи Skyhook, яка використовує гачок на краю кінця крила, щоб зачепити мотузку, що висить на стовпі висотою 9-15 м. Він не потребує злітно-посадкової смуги для запуску або посадки.

При випробуваннях БПЛА Scan Eagle було продемонстровано низку його переваг. За 45-хвилинним польотом, який проходив у заданих контрольних точках, можна було спостерігати за допомогою GPS. Також під час польоту можна було вручну змінювати курс польоту. Посадка була здійснена за новою технологією Skyhook, яка полягає в зачепленні апарату за трос, що звисає з встановленої щогли висотою 9-15 метрів.

Технічні характеристики Scan Eagle показано у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

ТТХ Scan Eagle

Довжина, м	1,37
Розмах крил, м	3,11
Максимальна взлітна маса, кг	20
Максимальна швидкість, км/год	148
Крейсерська швидкість, км/год	90
Максимальний радіус дії, км	120
Практичний радіус дії, км	100
Тривалість польоту, год	більше 24
Максимальна висота польоту, м	6000
Супутникова навігаційна система	GPS, GPS Navstar

Висока точність підтримується під час динамічних маневрів, таких як стійкі повороти з високою перегрузкою, завдяки фільтрації Калмана та опорному магнітометру GPS. Scan Eagle має канал передачі даних UHF 900 МГц і низхідний канал S-діапазону 2,4 ГГц для передачі відео [6].

Hermes 450 (рис. 1.4.) – багатоцільовий розвідувальний БПЛА, розроблений ізраїльською компанією Silver Arrow [7].

Даний багатоцільовий БПЛА з високою дальністю польоту призначений для ведення спостереження, патрулювання з повітря, розвідки та підтримки

комунікацій у польових умовах. За деякими даними, Hermes 450 може також нести ракети «повітря-земля» і використовувався ізраїльтянами для «точкового» знищення лідерів палестинських бойовиків. Проте сам виробник комплексів про це не заявляє. Однорухова модифікація БПЛА була замовлена Армією Оборони Ізраїлю в 1997 році як заміна для IAI Scout і використовується досі. Приблизна вартість комплексу, що включає наземні системи, - близько \$10 млн. Сам безпілотний літак коштує близько \$2 млн [8].

БЛА повністю виготовлений із композитних матеріалів, що ускладнює його виявлення засобами ППО. Індекс «450» у назві моделі означає максимальну злітну вагу апарата – 450 кг.



Рис. 1.4. Hermes-450

Технічні характеристики HERMES-450 представлені у табл. 1.5.

Таблиця 1.5

ТТХ HERMES-450

Довжина, м	6,1
Розмах крил, м	10,5
Власна маса, кг	200
Крейсерська швидкість, км/год	130
Практичний радіус дії, км	200
Тривалість польоту, год	більше 20
Максимальна висота польоту, м	6000
Супутникова навігаційна система	GPS, GPS Navstar

Автопілот працює повністю автономно, використовуючи приймач GPS. У разі відмови GPS, БПЛА переходить у режим відліку часу, що дозволяє зберегти

синхронізацію сигналів. Комплекс має два навігаційних комп'ютери, два комплекти зв'язкового обладнання та інші систем [9].

Bayraktar TB2 – це військовий БПЛА класу MALE, розроблений та виготовлений турецькою компанією Bayrak. Висококласна конструкція, яка забезпечує всі рішення, які можуть знадобитися оператору, в одній інтегрованій системі [10].

Технічні характеристики Bayraktar TB2 (табл. 1.6).

Таблиця 1.6

ТТХ Bayraktar TB2

Довжина, м	6,5
Розмах крил, м	12
Власна маса, кг	500
Крейсерська швидкість, км/год	130
Практичний радіус дії, км	130
Тривалість польоту, год	27
Максимальна висота польоту, м	8200
Канал передачі даних	LOS
Частотні діапазони	UHF, C, S
Супутникова навігаційна система	GPS, GPS Navstar

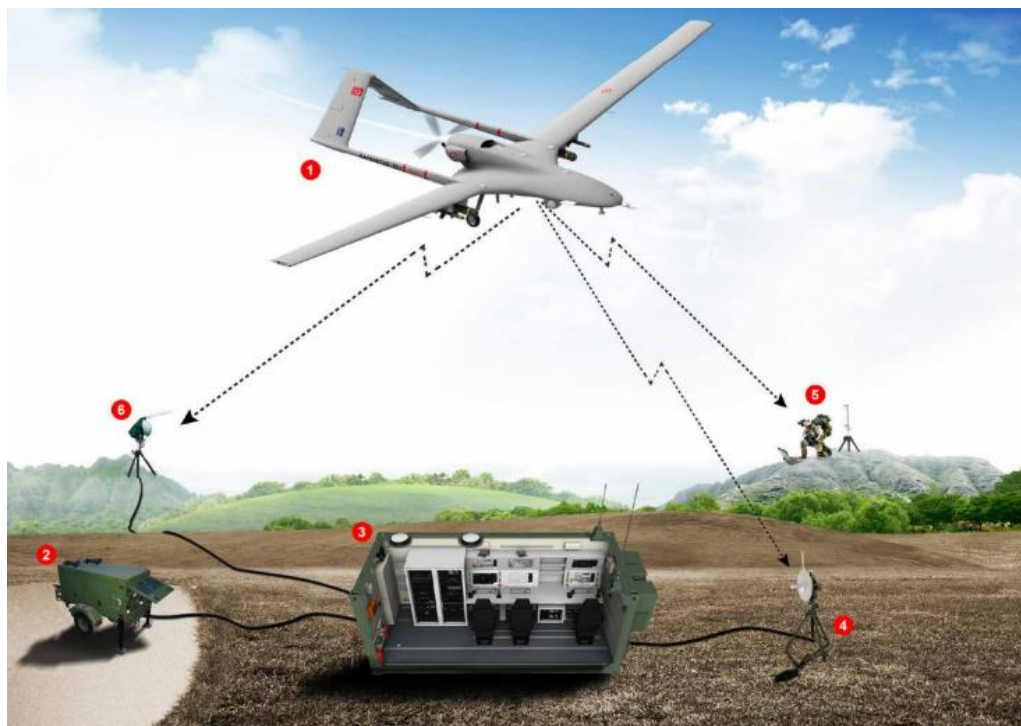


Рис. 1.5. Структурна схема взаємодії наземної станції управління з БПЛА Bayraktar TB2

Відповідно до рис. 1.5: 1 – БПЛА Bayraktar TB-2, 2 – генератор, 3 – наземна станція управління, 4 – антена з круговою діаграмою спрямованості (всеспрямована), 5 – переносна міні-параболічна антена носимої станції управління для розвідувальних груп, 6 – поворотна параболічна антена.

Система керування польотом(рис. 1.5) здійснює автономне керування, злет, навігацію, посадку без допомоги зовнішніх датчиків. Архітектура синтезу датчиків із застосуванням сучасних нелінійних методів керування забезпечує хороше управління та наведення БЛА. БПЛА також здатний використовувати напівавтоматичний режим під час виконання завдань [11].

У Bayraktar TB2 є два принципових недоліки – обмежена прямим радіозв'язком невелика дальність дії (до 150 км) і необхідність прямої підсвітки цілі. Щоб точно поразити ціль, ударний безпілотник повинен підсвітити її лазерним цілевказівником, який не може світити далі 3,5 км від наклону. Значить, він повинен знаходитися на висоті максимум 2,5 км і доступний для ураження майже всіма системами ППО, від ракетних до пушечних [12].

1.2. Аналіз БПЛА, які працюють з ШСЗ

У більшості випадків штучні супутники землі (ШСЗ), використовуються в лініях зв'язку з важкими або бойовими БПЛА, для командно-телеметричного зв'язку на великих відстанях. У наведеному випадку потік даних обмежується мінімально потрібною інформацією про стан БПЛА, проміжок передачі якої може становити від 30 до 400 секунд.

1.2.1. RQ-4 Global Hawk

RQ-4A Global Hawk (рис. 1.6) – стратегічний розвідувальний БПЛА виробництва США відноситься до категорії HALE(High-Altitude Long Endurance), тобто безпілотник, який 30 годин може проводити розвідувальну місію на висоті до 20 тис. метрів. Створений Teledyne Ryan Aeronautica – американською компанією (дочірнє підприємство фірми Northrop Grumman) [12].



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд RQ-4A Global Hawk

RQ-4A Global Hawk оснащений як датчиком EO/IR, так і радаром із синтетичною апертурою (SAR) з виявленням рухомої цілі (MTI), що дозволяє вести цілодобову, всепогодну розвідку. Дані датчиків передаються через канали передачі даних CDL LOS – X-діапазон або високошвидкісним зв'язком за межами прямої видимості (BLOS) - Ku-діапазон SATCOM на станцію керування місією (MCE)(рис.1.7) [20].



Рис. 1.7. Станція управління місією

Технічні характеристики RQ-4A Global Hawk представлено у табл. 1.7.

Таблиця 1.7

ТТХ RQ-4A Global Hawk

Довжина, м	13,53
Розмах крил, м	35,3
Власна маса, кг	6781
Крейсерська швидкість, км/год	575
Тривалість польоту, год	28
Максимальна висота польоту, м	20000
Канал передачі даних	LOS/BLOS
Частотні діапазони	UHF, L, C, S, X, Ku
Супутникова навігаційна система	GPS, GPS Navstar

На рис 1.8 зображено схему організації управління RQ-4A Global Hawk [20].

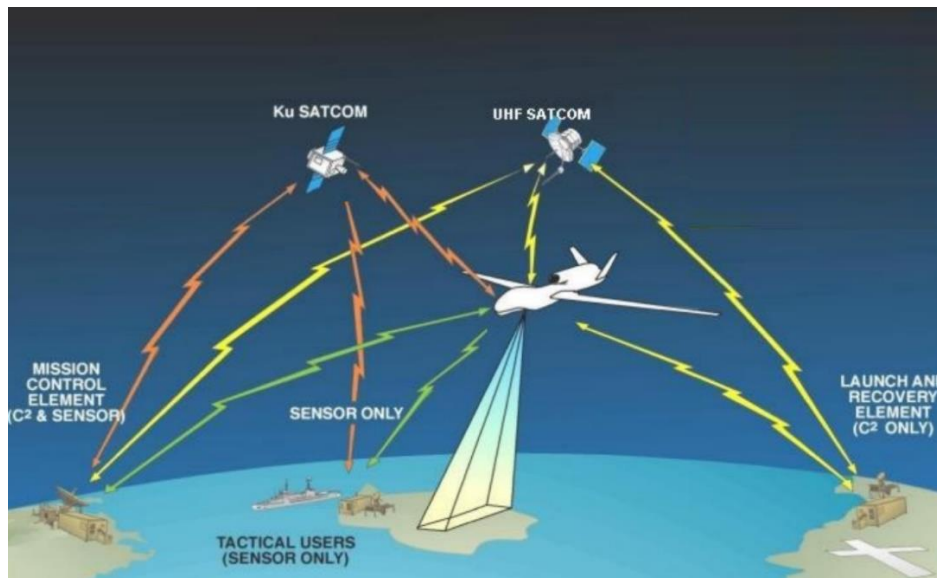


Рис. 1.8. Схема керування БПЛА RQ-4A Global Hawk

1.2.2. MQ-9 Reaper

MQ-9 Reaper (рис.1.9) – БПЛА класуUCAV, спроектований компанією General Atomics Aeronautical Systems.

Призначений для експлуатації у ВМС та ВПС США і Британських ВПС. Перші випробування відбулися 2 лютого 2001.



Рис.1.9. MQ-9 Reaper

В склад однієї тактичної одиниці MQ-9 входить декілька БПЛА, комунікаційна апаратура, наземна станція керування. Схема управління БПЛА MQ-9 Reaper показана на рис. 1.10.

Супутниковий зв'язок є надзвичайно мобільним, з високою надійністю і стійкістю до завад, високою швидкістю передачі даних. Ці функції є корисними для БПЛА з відеозв'язком або датчиками зображення для критично важливих завдань. Супутники на низькій навколоземній орбіті (LEO), що працюють на висоті 2000 км, і супутники на геостаціонарній навколоземній орбіті (GEO), що працюють на висоті 35 000 км, є двома популярними технологіями SATCOM, які використовуються для БПЛА. Порівняльна характеристика систем супутникового зв'язку, які використовуються для керування БПЛА показано у табл. 1.9.

Таблиця 1.9

Компанії, що надають послуги BLOS SATCOM для БПЛА

Компанія	InmarSAT	InmarSAT	Iridium	Globalstar	SpaceX
Продукт	BGAN	GX	Iridium NEXT	Globalstar	SpaceX
Орбіта	GEO	GEO	LEO	LEO	LEO
К-сть супутників	3	3	66	24	4000
Діапазон	L	Ka	L	S i L	Ku
Затримка даних	800 мс	600 мс	40 мс	40 мс	150 мс
Пропускна здатність на супутник	800 Мбіт/с	12 Гбіт/с	невідомо	невідомо	50 Гбіт/с
Загальна пропускна здатність	2.4 Гбіт/с	36 Гбіт/с	невідомо	невідомо	200 Тбіт/с
Швидкість передачі даних на користувача	492 кбіт/с	5 Мбіт/с	128 кбіт/с	7.2 кбіт/с	Невідомо
Дата початку роботи	2012	2015	2017	2013	2020

1.3. Коротка характеристика бортового обладнання БПЛА

До складу БПЛА входять такі основні системи:

- планер (несуча конструкція);
- рухова установка;
- система електропостачання;
- система управління;
- навігаційна система;
- телеметрична система;
- система радіозв'язку.

Залежно від переліку розв'язуваних завдань на борту БПЛА можуть додатково встановлюватися такі системи та пристрої:

- системи оптико-електронної, тепловізійної, радіолокаційної, радіо- та радіотехнічної, радіаційної, хімічної, бактеріологічної та інших видів розвідки з малогабаритним накопичувачем розвіданих;
- засоби постановки активних радіоелектронних завад;
- пристрої наведення та корекції керованої зброї («підсвітки» цілей);
- засоби ураження, різних типів;

Взаємозв'язок основних підсистем БПЛА представлено на рис. 1.11.

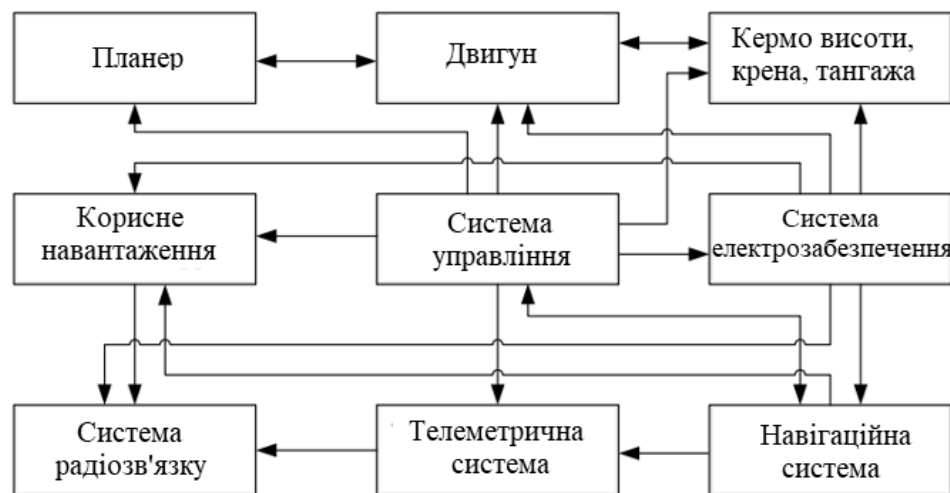


Рис.1.11. Схема взаємозв'язку між основними системами БПЛА

1.4. Методи управління БПЛА

За методами управління БПЛА класифікують на:

- автономні;
- напіваавтономні;
- керовані.

Зв'язок з БПЛА зазвичай здійснюється радіоканалом LOS або BLOS. Залежно від рівня автономності безпілотної системи (рис. 1.12) цей радіозв'язок активний постійно, або лише за запитом [21].

6 РІВНІВ АВТОНОМНОСТІ БПЛА


Рівень автономності	Рівень 0	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Рівень 4	Рівень 5
Участь людини						
Участь апаратури						
Рівень автономності	Відсутня автономність	Низька автономність	Часткова автономність	Умовна автономність	Висока автономність	Повна автономність
Опис	Управління в повному обсязі здійснює людина	Оператор залишається біля ПУ, але БПЛА контролює як мінімум одну життєву важливу функцію	Відповідальність за безпечну роботу несе оператор.	Оператор діє як запасна система. Дрон може виконувати всі функції за певних умов.	Оператор не керує БПЛА. У БПЛА є резервні системи, так що в разі відмови спрацьовує одна з них.	БПЛА повністю автономний

Рис. 1.12. Автономність управління БПЛА

Зв'язок з БПЛА в залежності від дальності поділяється на управління в зоні прямої видимості (LOS) (рис.1.13) та за межею прямої видимості (BLOS).

Відстань, на якій наземна антена має прямий зв'язок із ЛА із гладкою поверхнею Землі, регулюється так званою моделлю Землі чотирьох третин. Назва походить від основного припущення, що радіочастотний ефективний радіус Землі дорівнює 4/3 фактичного радіуса на основі характеристик радіочастотної передачі. Співвідношення дальності прямої видимості виходить безпосередньо з тригонометричних співвідношень, де похилий відрізок дальності є дотичним до Землі.

Припускаючи, що антена знаходиться на поверхні, відстань нахилу прямої видимості R для БПЛА на висоті h дорівнює [31]:

$$R = 1.23 \cdot \sqrt{h} \quad (1.1)$$

Якщо антена піднята над землею на висоту H , як показано на рис. 1.11, загальна відстань прямої видимості стає:

$$R = 1.23 \cdot (\sqrt{h} + \sqrt{H}) \quad (1.2)$$

У всіх операціях, крім дуже близьких, використовуються спрямовані антени стеження. Оскільки підсилення збільшується для кращої продуктивності зв'язку на великій відстані, вимоги до точності наведення стають більшими. Грубий підхід до відстеження полягає в тому, що людина-оператор фізично наводить антену вручну на основі знання місцезнаходження безпілотного апарата відносно наземної станції. Для цього підходу потрібна спеціальна особа, і продуктивність відстеження може бути незадовільною в робочих умовах.

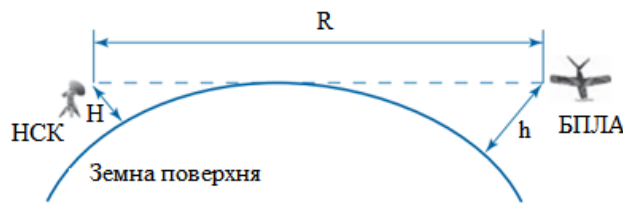


Рис. 1.13. Геометрія LOS

Більш складні системи мають системи автоматичного стеження. Простим механізмом зворотного зв'язку є відстеження пікової потужності радіочастот, коли система відстеження використовує пеленгацію (DF) для передавача безпілотного апарату. Більш інтегровані системи відстеження використовують інформацію про місцезнаходження безпілотного літального апарату, яку надає наземна станція. Наземній станції керування потрібне радіочастотне з'єднання для визначення фактичного положення ЛА, тому відновлення втраченого зв'язку потребує прогнозування автономної поведінки безпілотного літального апарату. Антени стеження можуть роз'єднувати залежності наведення від інформації, наданої наземною станцією управління, шляхом аналізу закодованих повідомлень у потоці радіочастотних модульованих даних, який містить дані про місцезнаходження безпілотного літака.

Зв'язок за межами прямої видимості (BLOS) виникає, коли передавач і приймач не можуть комунікувати з прямою видимістю і повинні використовувати вузли ретрансляції для повторної передачі сигналу. Відсутність прямої видимості зазвичай пов'язана з фізичним блокуванням, спричиненим

рельєфом або кривизною Землі. BLOS потребує одного або кількох вузлів ретрансляції для зв'язку. Кожен вузол ретрансляції отримує сигнал, а потім повторно передає його наступному елементу ланцюга.

Ретрансляційними вузлами зазвичай є інші бортові платформи або супутники. Бортовими платформами можуть бути інші безпілотні літальні апарати, дирижаблі, повітряні кулі або пілотовані літальні апарати. Прикладом бортового ретранслятора є система Northrop Grumman RQ-5A Hunter, яка служила ретранслятором для інших платформ Hunter наприкінці 1990-х років.

Супутниковий зв'язок (SATCOM) є більш поширеним засобом забезпечення зв'язку BLOS для БПЛА. Супутники мають перевагу передачі інформації на дуже великі відстані, навіть глобально. Це увімкнуло модель дистанційного розділення операцій, коли безпілотний літальний апарат запускається та піднімається за допомогою наземної станції запуску та відновлення (LRE). Сама місія виконується елементом керування місією (MCE), який може перебувати на іншому континенті. Northrop Grumman RQ-4A/B Global Hawk, General Atomics MQ-1 Predator A і MQ-9 Reaper можуть працювати таким чином.

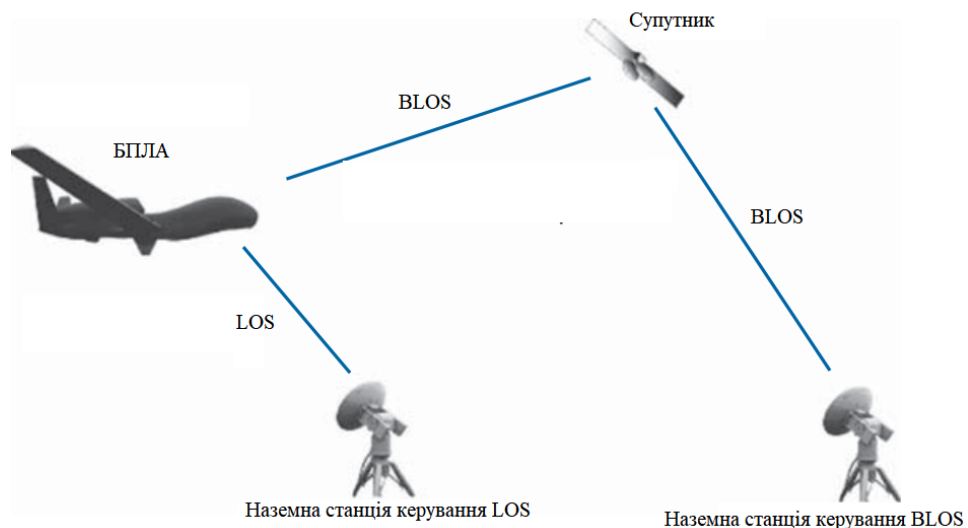


Рис. 1.14. Комунікаційна архітектура віддалених операцій

БПЛА, класів MALE, HALE, включають канали SATCOM з більшою пропускною здатністю. Вони підтримують не лише C2, але й високошвидкісні

зворотні зв'язки з корисним навантаженням. Для цих каналів зв'язку потрібні антени з високим коефіцієнтом підсилення, які можна точно направити на супутник. Механічно керовані параболічні антени є найпоширенішим підходом сьогодні, хоча фазовані антени з електронним керуванням, також стрімко розвиваються. Архітектура зв'язку SATCOM для БПЛА показана на рис.1.14 [31].

1.4.1. Організація управління БПЛА за допомогою супутника ретранслятора.

Залежно від класу/корисного навантаження БПЛА виконують дуже широкий спектр завдань, таких як радіорозвідка (SIGINT), ретрансляція лінії передачі даних (DL), розвідка/спостереження/рекогноситування (ISR), а також як секретні місії, у тому числі ударні-місії БПЛА типуUCAV.

БПЛА характеризуються:

- висотою/швидкістю. У відповідності з різними доступними типами можна очікувати практично будь-яку висоту польоту і швидкість (дозвукову);
- ефективною площею розсіювання. ЕПР може варіюватися від надзвичайно низьких значень $<0,01$ до $0,1$ м² у нових БПЛА від 1 до 4 м² у MALE та тактичних БПЛА і аж 10 м² для HALE;
- електромагнітним випромінюванням. Активні радіочастотні датчики; ненаправлені/направлені канали передачі даних (пряма видимість (LOS) для висхідної та низхідної лінії зв'язку, з декількома типами/операціями, які також використовують супутникові зв'язки (SATCOM) висхідні та низхідні лінії зв'язку). З новим використанням інтелектуальних алгоритмів і функцій для таємних місій вони можуть створювати лише ненавмисні випромінювання (бортова навігаційна, рухова установки та обладнання для наведення). Спеціально для TUAV (і, можливо, MALEs), можна використовувати канал передачі даних на частоті VHF/UHF.

На рис. 1.15–1.16 показано умовно організацію розвідувальної місії важких БПЛА, з використанням супутникового зв'язку [15].

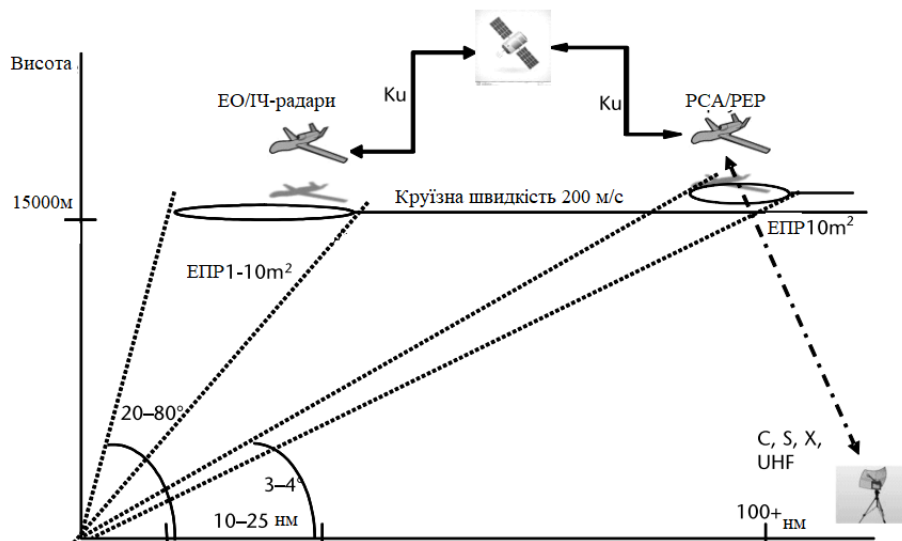


Рис. 1.15. Організація розвідувальної місії БПЛА категорії HALE

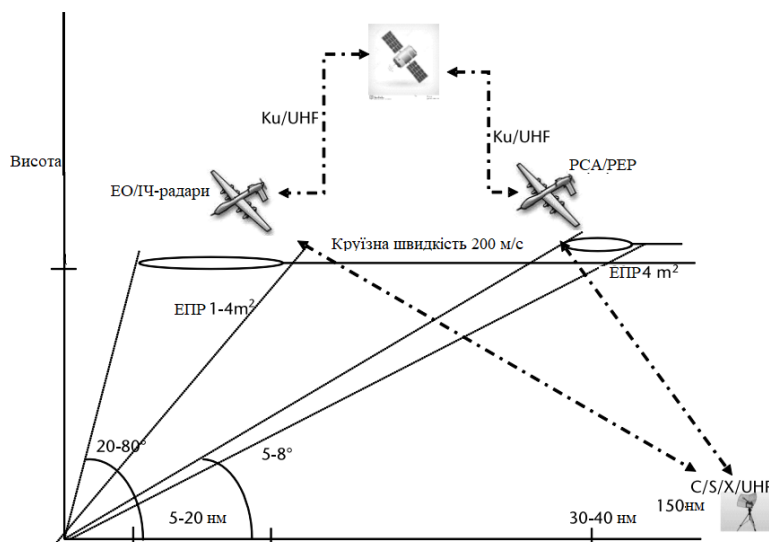


Рис. 1.16. Організація розвідувальної місії БПЛА категорії MALE

1.5 Огляд засобів радіоелектронного подавлення каналів радіоуправління, телеметрії та навігації БПЛА

Постійно зростаюча кількість безпілотних літальних апаратів, різноманітність можливих сценаріїв їх застосування у військових конфліктах для вирішення різних завдань та труднощі знищення їх традиційними засобами протиповітряної оборони (ППО), обумовлена в основному малими розмірами та висотами польоту БПЛА, визначили необхідність розробки спеціальних методів та засобів боротьби з ними [25].

Додаткову складність для розробки методів та засобів боротьби з БПЛА вносить широка номенклатура існуючих безпілотних апаратів масою від менше 0,025 кг. і до стратегічних БПЛА з масами, висотами та тривалістю польоту, характерними для пілотованих апаратів.

В даний час основними методами боротьби з БПЛА є:

- радіоелектронне подавлення каналів радіозв'язку, телеметрії та радіонавігації; інформаційний вплив на систему керування;
- вивід БПЛА з ладу шляхом застосування лазерного або мікрохвильового випромінювання;
- знищення БПЛА традиційними засобами ППО.

Типовий комплекс РЕП повинен виконувати такі завдання:

- ведення радіотехнічної розвідки;
- обробка розвідувальних даних та формування карти поточної радіоелектронної обстановки;
- визначення параметрів і координат джерела випромінювання для забезпечення цілі і оцінки ефективності подавлення;
- здійснення радіоелектронного подавлення засобів зв'язку та радіолокації у зоні своєї відповідальності.

1.5.1. Зарубіжні комплекси боротьби з БПЛА

У більшості сучасних систем боротьби з БПЛА реалізується модульний принцип побудови що передбачає комплексування найрізноманітніших засобів виявлення, супроводу та нейтралізації літальних апаратів, включаючи РЛС, техніку ОЕ та радіоелектронної розвідки (РЕР), а також засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) та різні за типом впливу засоби ураження. Так, військово-повітряні сили (ВПС) Великобританії у 2020 році отримали перший комплект системи «ORCUS» (рис.1.17), що включає РЛС, модулі ОЕ та ЕР, а також засоби РЕБ та підсистему управління [26].

Дані методи реалізуються різними технічними засобами наземного, морського та повітряного базування, при цьому самі засоби можуть бути

переносними, мобільними, розміщуватися безпосередньо на транспортних платформах або у відповідних контейнерах, та стаціонарними [25].



Рис.1.17. Система «ORCUS»

Ізраїльський комплекс боротьби з БПЛА EL/I-6030 «Drone Guard» (рис. 1.18) включає трьох-координатну РЛС, ОЕ та ІЧ засоби спостереження, а також засоби РЕР та РЕБ [27].

Даний комплекс автоматично виявляє та контролює переміщення до 100 повітряних об'єктів однієї групи, зокрема БПЛА [23].



Рис. 1.18. Drone Guard

Застосовуваний у ЗС Ізраїлю та інших країн комплекс «Drone Dome» у мобільному варіанті виконання монтується на легкий транспортний засіб типу баггі, складається з РЛС RPS-42, засобів ОЕ та ІЧ спостереження, засобів РЕБ,

що включають апаратуру радіоконтролю та подавлення широкосмугових радіомереж. Існує версія комплексу, оснащеного лазерною зброєю.

Існують також спеціально розроблені комплекси та засоби, що враховують різні особливості застосування та технічної оснащеності БПЛА. Найпростішими засобами є РЕБ індивідуального застосування, що виготовляються різними виробниками у формі пістолетів чи рушниць. Як правило, вони забезпечують подавлення розміщених на БПЛА радіозасобів, що працюють в діапазонах 433 і 840-940 МГц, а також радіозв'язкового обладнання стандарту Wi-Fi -діапазонів 2,4 та 5,8 ГГц та навігаційної апаратури космічних радіонавігаційних систем GPS, NAVSTAR , та в ряді випадків – ГЛОНАСС та «BeiDou» на дальностях від 0,5 до 2 км.

1.5.2. Українські розробки засобів РЕБ і РЕП БПЛА

Комплекс боротьби з БПЛА «ANKLAV» (рис. 1.19) призначений для подавлення навігаційних приймачів GPS або ГЛОНАСС.

Це ефективний засіб у боротьбі з безпілотниками та високоточною зброєю.

Даний комплекс виготовляється в мобільному і стаціонарному варіантах з спрямованими і неспрямованими антенами.



Рис. 1.19 Комплекс боротьби з БПЛА «ANKLAV»

Комплекс має наступні технічні характеристики: дальність постановки завад – з неспрямованою антеною 20 км і з спрямованою антеною 40 км; режими роботи: GPS jamming / GLONASS jamming/ GPS/GLONASS jamming [29].

Вukovel-AD (рис. 1.20) – ефективний комплекс радіоелектронної боротьби з широким спектром типів БПЛА. Має реальний бойовий досвід із кількома сотнями успішних результатів. Кожне технічне рішення системи є результатом накопиченого досвіду ведення бойових дій з високотехнологічним противником. Система має високу мобільність, виконує комплекс завдань від виявлення, супроводу цілей до подавлення супутникових навігаційних каналів і каналів зв'язку між БПЛА і НСУ(наземна станція управління) [28].



Рис. 1.20. Vukovel-AD

Даний комплекс має наступні характеристики: діапазон виявлення – 320-6000 МГц, діапазон подавлення – 320-6000 МГц, дальність виявлення до 50 км, ефективна дальність подавлення – до 15-16 км; подавлення GNSS(ГНСЗ) – так; подавлення DataLink UAV-GS – так; кількість одночасно заглушених каналів – 11; погодні умови – будь-яка погода, час переходу з транспортно-бойового положення – 2 хв.

Одним із найбільш нових рішень у галузі радіоелектронної боротьби з БПЛА є розробка фірми «Інфозахист», яка називається «Хортиця-Р» (рис. 1.21). Система призначена для виявлення та розрахунку місця розташування як самого БПЛА, так і його пункту управління. Комплекс в автоматичному режимі визначає факт радіопередачі між БПЛА і НСУ, проводить ідентифікацію БПЛА, після чого автоматично направляє антено-фідерний пристрій і запускає систему встановлення електронних завад [17].



Рис.1.21. Комплекс РЕБ Хортиця-Р

Система радіоелектронного подавлення, на відміну існуючих рішень, генерує модульовані імпульси з довжиною, близької до довжини сигналів управління, що дозволяє ефективно протидіяти системам із довжиною сигналу більше 2 мс. Що, в свою чергу, збільшує ефективність радіоподавлення, а також зменшує ймовірність виявлення комплексу противником. Додатково система оснащується системою постановки активних завад (спуфінгу) для навігаційних супутникових систем (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, GPS NAVSTAR, BeiDou). Радіус дії "Хортиці-Р" на даний момент не розголошується, зате відомо, що комплекс працює в частотному діапазоні 25-6000 МГц [22].

1.5.3. Узагальнення ТТХ засобів РЕБ/РЕП систем навігації та управління БПЛА

На основі розглянутих комплексів протидії безпілотним літальним апаратам в підрозділах 1.5.2.-1.5.3. можна сформуванати наступні типові характеристики системи радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам.

Тактико-технічні характеристики підсистеми радіотехнічної розвідки:

- діапазон частот, в якому ведеться РТР: 20-15000 МГц;
- дальність розвідки ПУ БПЛА: до 10-30 км;
- дальність розвідки БПЛА: до 30-50 км;
- ймовірність пеленгування сигналів типу ППРЧ зі швидкістю щонайменше 1000 стрибків/с: не менше 0,85;
- середньоквадратична помилка (СКП) пеленгування джерела випромінювання в діапазоні від 200 до 6000 МГц: трохи більше 2°.

Тактико технічні характеристики підсистеми РЕП(радіоелектронного подавлення):

- діапазон частот, в якому ведеться подавлення: 200-6000 МГц.

Подавлення частот:

- частоти типових каналів неліцензованих засобів радіозв'язку: 20-80, 135-174, 400-470 МГц;
- частоти типових каналів авіаційного радіозв'язку в діапазоні 220-400 МГц;
- частоти типових каналів комерційних систем зв'язку: 430-460, 860-880, 902-928 МГц, CDMA800 (850-894 МГц), GSM900 (890- 915, 935-960 МГц), GSM1800 (1710-1880 МГц), 3G (2110- 2170 МГц), 4G (725-770, 780-960, 925-960 МГц; 1,7-2,2, 2,5- 2,7 ГГц), Wi-Fi (2,4-2,5, 4,9-6,425 ГГц);
- частоти каналів "вниз" супутникових систем зв'язку (ССЗ) L-діапазону: Інмарсат (1518-1660,5 МГц), Ірідіум (1616- 1626,5 МГц);
- частоти каналів супутникових навігаційних систем(СНС): GPS (L1 – 1575,42 МГц / L2 – 1227,6 МГц / L5 – 1176,45 МГц), ГЛОНАСС (L1 – 1602 МГц

/ L2 – 1246 МГц), BeiDou (B1 – 1561,098 МГц / B2 – 1207,14 МГц / B3 – 1268,52 МГц), Galileo (E1 – 1575,42 МГц / E6 – 1278,75 МГц / E5 – 1191,79 МГц).

Енергопотенціал впливу:

- на канал передачі «БПЛА – НСК»: 0,3-0,5 кВт;
- на канал управління «ПУ – НСК» та телеметрії «БПЛА – ПУ»: 0,5-1 кВт;
- канал СНС на БПЛА: 0,3-0,5 кВт.

Дальність подавлення приймальних трактів:

- засобів зв'язку на пульті управління: до 10-25 км;
- засобів зв'язку на БПЛА: до 30-50 км;
- каналу СНС на БПЛА: до 30-50 км.

Тип формованих завад:

- для каналів зв'язку та управління: прицільна та ковзна за частотою, загороджувальна по діапазону частот;
- для каналу навігації по СНС: прицільна за частотою та структурою сигналу з метою формування хибної навігаційної інформації (за відкритими частотами СНС); шумова прицільна за частотою (за відкритими або закритими частотами СНС).

Зазначимо, що у ТТХ деяких комплексів вказується опціональна можливість формування хибних режимів роботи для каналів управління та навігації БПЛА, яка називається "перехоплення управління". Разом з тим, виробники даних комплексів, зазвичай, докладно не розкривають механізми такого «перехоплення», що саме під ним розуміється. Більш докладно можливість формування хибних режимів роботи для каналів управління та навігації БПЛА, але тут же необхідно відзначити, що така функціональність може бути реалізована щодо виключно окремих типів БПЛА, принципи функціонування яких були завчасно вивчені, і відповідно до них були сформовані відповідні програми «перехоплення управління».

1.6. Висновки до розділу 1

Узагальнено класифікацію безпілотних літальних апаратів за тактико-технічними характеристиками. Проведено аналіз типових схем організації каналів управління, передачі даних телеметрії БПЛА, які працюють з штучними супутниками Землі. Розглянуто зарубіжні та українські розробки комплексів РЕБ/РЕП БПЛА та узагальнено їх тактико-технічні характеристики.

З проведеного аналізу можна побачити, що в загальному на сьогоднішній день військові системи РЕП БПЛА є ефективним засобом вирішення завдань подавлення каналів управління, телеметрії та навігації. Недостатня «інтелектуальність» постановки завад у цих комплексах компенсується їх високими енергетичними можливостями та універсальністю застосування стосовно всіх типів БПЛА. Основними недоліками сучасних комплексів РЕП є дальність ефективної протидії, «інтелектуальність» постановки завад, а також електромагнітна сумісність.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Частотні діапазони каналів радіоуправління, навігації, телеметрії та передачі даних БПЛА

Зв'язок між НСК і БПЛА, а також між БПЛА і НСК може здійснюватися за допомогою двох різних засобів: радіо або лазерного променя. Радіозв'язок між БПЛА та НСК може бути прямим або через супутники чи інші засоби радіорелейної передачі. Типові радіочастоти для зв'язку коливаються від 3 Гц до 300 ГГц (нижче інфрачервоного спектру електромагнітних хвиль). Частоти в діапазоні від 3 Гц (надзвичайно низька частота, ELF) до 3 ГГц (надвисока частота, UHF) є ефективними радіочастотами, оскільки вони з мають найменші втрати при поширенні в атмосфері. Вибір робочої частоти вимагає компромісу. Нижча частота забезпечує краще та надійніше розповсюдження, водночас знижуючи швидкість передачі даних. Навпаки, більш висока частота здатна забезпечувати високі швидкості передачі даних. Наприклад, телевізійна камера з високою роздільною здатністю забезпечує швидкість передачі даних близько 75 мегабайт на секунду.

Найбільш застосовувані антени для БПЛА: (1) вертикальна антена, (2) антена Уда-Ягі, (3) параболічна антена та (4) прямокутна мікросмугова або патч-антена з фазованою решіткою [31]. На рис. 2.1 зображено супутникову антену NASA Altair.



Рис. 2.1. Супутникова антена NASA Altair

БПЛА General Atomics RQ-1 Predator був першим БПЛА, яким керували через супутниковий зв'язок, і першим БПЛА, який забезпечував голосовий радіозв'язок. Великі сучасні БПЛА (наприклад, MQ-9 Reaper, Nasa Altair оснащені супутниковою антеною(рис.2.1). Наземна станція керування для RQ-1A Predator використовує канали передачі даних С- та Ku-діапазону для зв'язку з БПЛА в режимі прямої видимості та BLOS відповідно. Дальність дії без втрати зв'язку, а отже і ефективний радіус дії ЛА, становить близько 740 км. BLOS-зв'язок у перших трьох системах Predator оброблявся через програму SPIRIT SATCOM.

З'єднання, типи та основні характеристики каналу управління БПЛА підсумовані у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики каналу телеметрії, радіоуправління та передачі даних БПЛА

	Призначення	З'єднання	Напрямок зв'язку	Тип застосування	Робочі частотні діапазони
Телекомунікаційний потік	Управління польотом	НСК → Автопілот	Вверх ↑	Управління	HF, VHF/UHF
	Дані управління	НСК → Датчики	Вверх ↑	Управління	HF, VHF/UHF
	Статус польоту	Автопілот → НСК	Вниз ↓	Телеметрія	VHF/UHF
	Дані завдання	Датчики → НСК	Вниз ↓	Управління	L, S, C, X, Ku, Ka
	Звіт про хід польоту	БПЛА → НСК	Вниз ↓	Телеметрія	VHF/UHF, L, S
		БПЛА ↔ НСК	Два напрямки ↑↓	Телеметрія	VHF/UHF, L, S
	Координація польоту	Оператор ↔ БПЛА	Два напрямки ↑↓	Управління	HF, VHF/UHF
Координація місій	Оператор ↔ БПЛА	Два напрямки ↑↓	Управління	HF, VHF/UHF, L, S, C, X, Ku, Ka	

Проаналізувавши дані табл. 2.1 можна побачити, що управління БПЛА і передача даних здійснюється в основному за допомогою радіочастотних засобів, зазвичай супутникові лінії зв'язку з БПЛА використовуються в режимі BLOS. Найпоширенішими діапазонами частот цього типу каналів є діапазони Ku, S, L, C і X. Історично діапазон Ku використовувався для високошвидкісного зв'язку. Через коротку довжину хвилі та високу частоту цей діапазон страждає від великих втрат при розповсюдженні. Проте він також здатний долати більшість завад, передаючи таким чином велику кількість даних. Діапазон K має широкий діапазон частот, який передає великі обсяги даних. Однак він потребує потужних передавачів і чутливий до завад навколишнього середовища. Діапазони S і L не дозволяють передавати дані зі швидкістю передачі вище 500 кбіт/с. Їхні сигнали великої довжини хвилі здатні проникати в наземну інфраструктуру, і передавач потребує менше енергії, ніж у Ku-діапазоні. Діапазон C вимагає відносно великої передавальної та приймальної антен. Діапазон X був зарезервований для військового застосування. У табл. 2.2 показано діапазони частот, які зазвичай використовуються для систем зв'язку і управління БПЛА.

Таблиця 2.2

Частотні діапазони

№	Діапазон	Частоти	Використання/характеристика
1.	HF	3-30 МГц	низька швидкість передачі даних, підходить для аналогового голосового сигналу.
2.	VHF	30-300 МГц	радіокеровані канали зв'язку 72 МГц.
3.	UHF	300-1000 МГц	передача аналогового відео, 433,05– 434,79– та 902–928 МГц (мкф) ISM смуги.
4.	L	1-2 ГГц	СНС, передача цифрового відео з ефективною пропускну здатністю
5.	S	2-4 ГГц	2.4 – 2.5 ГГц ISM смуги
6.	C	4-8 ГГц	5.725 –5.875 ГГц ISM смуги
7.	X	8-12 ГГц	радары
8.	Ku	12-18 ГГц	SATCOM
10.	Ka	26.5-40 ГГц	високі втрати при розповсюдженні, SATCOM

Навігаційні орієнтири – це вузли, які знають свої власні координати та оснащені можливістю зв'язку. Ці вузли періодично транслюють свої координати через навігаційне повідомлення іншим вузлам, таким як БПЛА [32].

Радіоканал, який використовується для трансляції таких навігаційних повідомлень, називається навігаційним каналом. За допомогою навігаційних повідомлень, отриманих від кількох опорних точок, БПЛА може визначити свою власну координату позиції, використовуючи методи локалізації, такі як триангуляція або мультилатерація. Цими навігаційними опорними точками можуть бути статичні інфраструктури на землі або супутники на орбіті Землі в космосі. Як правило, ці супутники є частиною глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС), такої як глобальна система позиціонування (GPS), ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Коротка порівняльна характеристика кількох ГНСС представлена в табл 2.3.

Таблиця 2.3

Глобальні навігаційні супутникові системи

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Розробник	США	Росія	ЄС	Китай
Висота	20180 км	19130 км	23222 км	21150
Кількість супутників	24	24	24+6 запасних	28
Частотні діапазони	1.563-1.587 ГГц	1.593-1.610 ГГц	1.559-1.592 ГГц	1.561-1.589 ГГц
	1.215-1.239 ГГц	1.237-1.254 ГГц	1.164-1.215 ГГц	1.207-1.268 ГГц
	1.164-1.189 ГГц	1.189-1.214 ГГц	1.260-1.300 ГГц	
Точність локалізації	0.3-5 м	2-4 м	0.01-1 м	0.1-3.6 м

Для створення каналів радіоуправління, передачі даних та телеметрії БПЛА типу MALE та HALE через супутникові системи зв'язку, зазвичай, використовуються системи Iridium, Milsat, при чому канали зв'язку утворюються в УКХ, L, X, Ku, Ka діапазонах. У діапазоні УКХ застосовують канали низькошвидкісного зв'язку шириною 25 кГц з QPSK. У L, Ku, X та Ka діапазонах проводять «пакування» каналу радіоуправління в широкосмуговий загальний супутниковий канал, на основі CDMA (Code Division Multiple Access) або MF-TDMA поділу з BPSK, QPSK, 8PSK, 8QAM радіосигналами.

Для управління військовими безпілотниками (наприклад, такими як RQ-4A Global Hawk та MQ-9 Reaper), організовується канал управління в прямій видимості з наземною станцією управління або ретрансляційним вузлом:

- центральні канали радіоуправління в діапазонах L (1,4-1,85 ГГц), S (2,2-2,5 ГГц), C (4,4-5,85 ГГц), та Ku (15,15-15,35/14,4-14,83 ГГц);
- резервні канали радіоуправління в УКХ діапазоні – 220-400 МГц;
- супутниковий канал зв'язку (зазвичай використовується низькоорбітальні супутникові системи зв'язку – додатковий канал, що монтується на вибраних БПЛА).

Ширина каналів зв'язку:

- ширина каналу «вверх» в L, S, C та Ku діапазонах: у режимі фіксованої частоти – 300-700 кГц, а у режимі широкосмугового сигналу – 0,7-28 МГц;
- ширина каналу «вниз» у L, S, C та Ku діапазонах – 3-20 МГц;
- ширина каналів «вверх»/«вниз» в УКХ діапазоні – 25 кГц.

Швидкості передачі даних у каналах радіоуправління:

- до 20 кбіт/с – у лінії «вверх»;
- 200 кбіт/с – у лінії «вниз» (при передачі лише телеметричної інформації);
- 1,6-12 Мбіт/с – у лінії «вниз» (при передачі телеметричної інформації спільно з даними від оптично-електронних засобів БПЛА для візуального управління оператором) L, S, C і Ku діапазонах;
- 2,4-16 кбіт/с у лініях «вверх»/«вниз» в УКХ діапазоні;
- до 2,4 кбіт/с в лініях «вверх»/«вниз» супутниковою лінією L діапазону.

2.1.1. Варіант зв'язку між БПЛА та НСК по прямому та супутниковому радіоканалах з використанням Ku-діапазону

Система зв'язку повинна складатися з універсального наземного терміналу (НТ), що працює у прямому та супутниковому радіоканалах та бортового терміналу (БТ) з двома відповідними радіочастотними модулями.

Частотний план Ku-діапазону для наземних терміналів супутникового та рухомого радіозв'язку:

Частотний план Ку-діапазону для супутникового та рухомого радіозв'язку

Частота, ГГц	Вид зв'язку	
	Прийом	Передача
14,5 – 14,8	Рухомий зв'язок	
13,75 – 14,5	–	Супутниковий зв'язок стандартний Ку-діапазон
10,95 – 12,75	Супутниковий зв'язок стандартний Ку-діапазон	–
10,0 – 10,55	Рухомий зв'язок	

З даних табл. 2.4 слідує, що універсальна НСК повинна працювати у розширеному діапазоні з такими границями:

- прийом: 10,0...12,75 ГГц;
- передача: 13,75 ... 14,8 ГГц.

На рис. 2.2 представлений варіант частотного плану зв'язку між БПЛА і НТ по прямому та супутниковому радіоканалах. Вхідна стрілка відповідає частотному діапазону приймання, а вихідна – передачі.

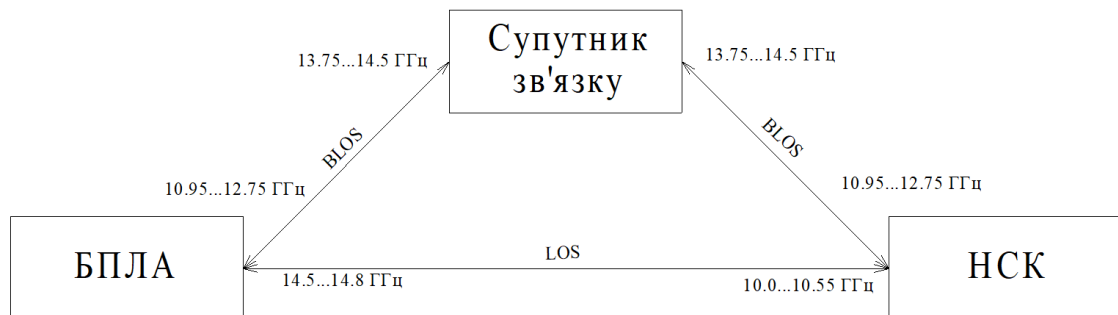


Рис. 2.2. Частотний план зв'язку між БПЛА і НСК

Інформаційний трафік між НТ та БПЛА – несиметричний. Від НТ до БПЛА передається низькошвидкісна командна інформація. Основні вимоги до каналу – мінімальний час затримки та максимальна стійкість до природних та навмисно створених завад.

Час затримки визначається часом поширення радіохвиль на трасі та часом обробки при кодуванні та декодуванні. Для передачі низькошвидкісної

командної інформації доцільно використовувати або традиційні згорткові коди алгоритму Вітербі, що забезпечують мінімальну тимчасову затримку, або більш сучасні конструкції типу VersaFec як компроміс між часом обробки та енергетичною ефективністю. Збільшення завадостійкості до впливу навмисних завад може досягатися шляхом розширення спектру радіосигналу.

Від БПЛА до НСК передаються два інформаційні потоки – низькошвидкісний телеметричний та високошвидкісний цільовий. Вимоги до завадостійкості та затримки в телеметричній радіолінії відповідають вимогам передачі командної інформації.

Оціночні характеристики каналу супутникового радіозв'язку представлено у табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Оціночні характеристики каналу супутникового радіозв'язку з БПЛА

Параметр	Характеристика параметра	
	Командна лінія	Інформаційно-телеметрична лінія
Напрямок передачі інформації	НСК – супутник – БПЛА	БПЛА – супутник – НСК
Сигнально-кодова конструкція	Вітербі	цільова інформація DVB-S2(X)
		телеметрія Вітербі
Інформаційна швидкість, кбіт/с	4,8 - 16	загальна 300...10000*
Антенa НСК	направлена з апертурою 2,4 м	
Антенa БПЛА	направлена з апертурою 0,6 м	
Вихідна потужність, Вт	до 2	до 50

Під час передачі високошвидкісних потоків цільової інформації основною вимогою є енергетична ефективність. Тому для супутникового радіоканалу можуть бути використані алгоритми стандартів DVB-S2 або VersaFEC, а для прямого, в умовах багатопроменевого поширення, перевагу слід віддати технології OFDM (DVB-T2) як найбільш стійкій до міжсимвольної інтерференції, втрати від якої можуть досягати 10 дБ. Значний пік-фактор, властивий радіосигналу DVBT2 з безліччю несучих ортогональних,

компенсується помірними вимогами до середньої вихідної потужності передавального пристрою прямого каналу.

Спосіб ущільнення радіосигналів цільової інформації та телеметрії вибирається виходячи з чисельності та тактичних особливостей застосування угруповань БПЛА. Одночасна робота з кількома БПЛА можлива супутниковим радіоканалом. У зоні прямої радіовидимості кількість обслуговуваних БПЛА обмежується шириною діаграми спрямованості антени НСК.

2.2. Види використовуваної модуляції для утворення каналів зв'язку з БПЛА

Види модульованих сигналів, що використовують в радіоканалах управління, передачі даних та телеметрії БПЛА є: двійкова фазова маніпуляція (BPSK), квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) і її різновиди: диференціальна QPSK, та SOQPSK, а також 2FSK, GMSK. Використовується режим псевдовипадкового перетворення робочої частоти у межах дозволеного до використання діапазону частот у S, C та Ku, наприклад, зустрічаються варіанти організації каналу керування БПЛА з використанням режиму псевдовипадкового перетворення робочої частоти по десяти каналах шириною 4 МГц у загальній полосі 40 МГц .

У L, Ku, X та Ka діапазонах проводять «пакування» каналу радіоуправління в широкосмуговий загальний супутниковий канал, на основі Code Division Multiple Access або Multi-Frequency Time Division Multiple Access поділу з BPSK, QPSK, 8PSK, 8QAM радіосигналами.

2.2.1. Схеми цифрової модуляції

Цифрова модуляція – це процес перетворення цифрового символу на сигнал, придатний передачі по каналу зв'язку. Відповідно до цього процесу інформація переноситься синусоїдальним сигналом:

$$s(t) = a(t) \sin(2\pi f(t)t + \phi(t)), \quad (2.1)$$

з трьома параметрами: амплітуда $a(t)$, частота $f(t)$ і фаза $\phi(t)$. Таким чином, шляхом кодування інформації в одному з параметрів, зберігаючи інші два незмінними, існують три основні схеми модуляції:

Амплітудна маніпуляція (ASK) – цифровий символ кодується амплітудою сигналу. Частотна маніпуляція (FSK) – сигнал із несучою частотою f_1 представляє цифровий 1, а сигнал із несучою частотою f_2 позначає цифровий 0. Простий модулятор FSK складається з перемикача та двох осциляторів із частотами f_1 та f_2 . Фазова маніпуляція (PSK) - інформація кодується у зміні фази сигналу, що передається.

Форми сигналів трьох вищевказаних базових схем для вхідної бітової послідовності $b=[1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1]$ показано на рис. 2.3.

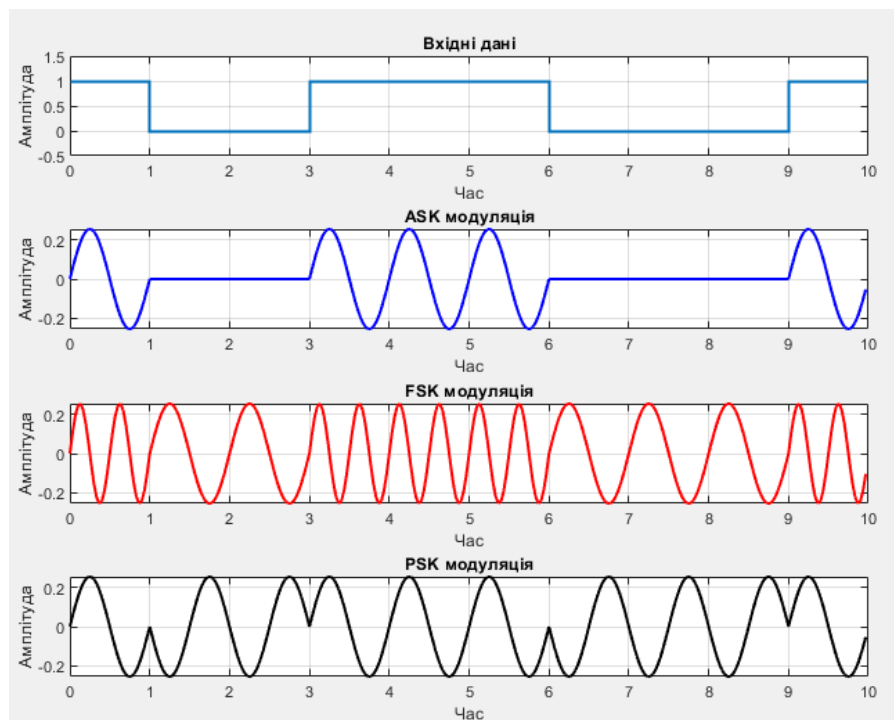


Рис. 2.3. Форма сигналу для амплітудної, частотної та фазової маніпуляції

Розширені схеми модуляції можуть бути отримані шляхом комбінування базових схем модуляції у відповідності вимогам передачі, наприклад, вищої ефективності пропускну здатності.

Існує багато комбінацій і варіацій основних методів модуляції. Деякі схеми модуляції можуть бути похідними від інших, а деякі можуть бути представлені

як наступники основних типів модуляції. Для супутникового зв'язку схеми модуляції можна класифікувати відповідно по їх чутливості до нелінійних спотворень на дві загальні групи сигналів: схеми модуляції з постійною та змінною обвідною. Ця класифікація проілюстрована на рис. 2.4. Схеми модуляції зі змінною обвідною включають два основних типи, фазові (PSK) і амплітудні (ASK) модульовані сигнали.

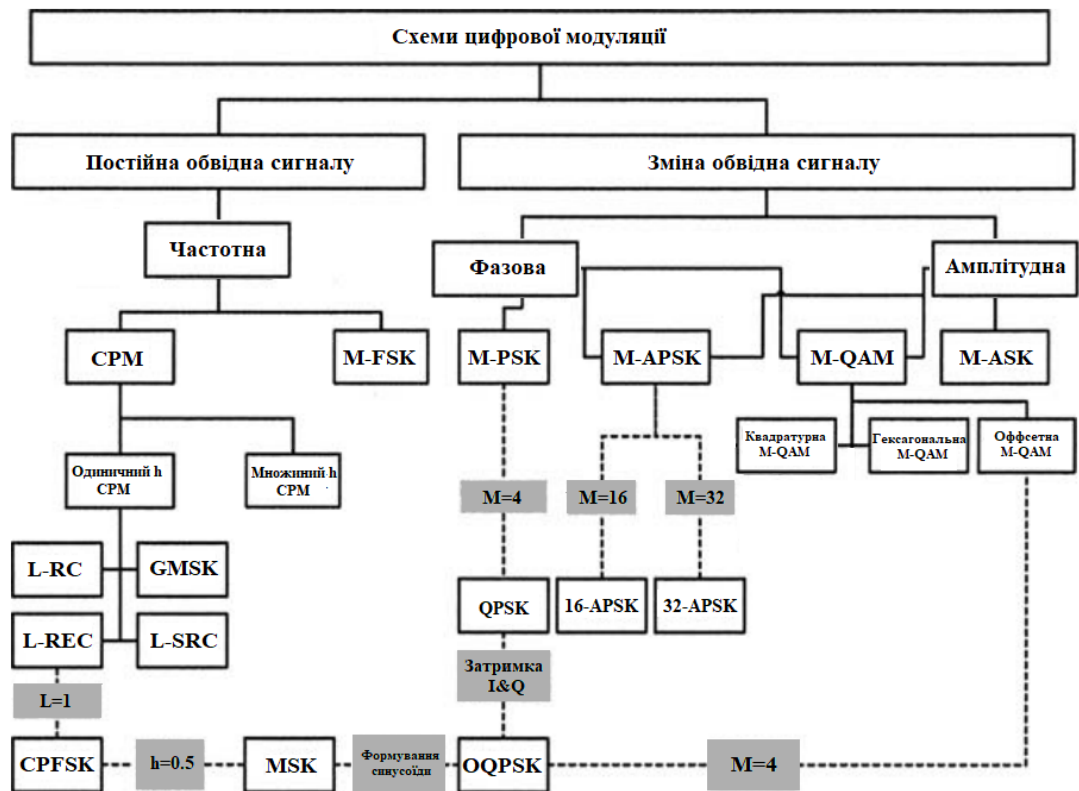


Рис. 2.4. Класифікація схем модуляції

2.2.2. Двійкова фазова модуляція

У BPSK фаза несучої зсувається між двома положеннями, які знаходяться на 180 градусів одне від одного.

На діаграмі I/Q канал I має два різних значення, як це зображено на рис. 2.5. На діаграмі стану є два можливі розташування, тому можна надіслати двійкову одиницю або нуль. Швидкість символу становить один біт на символ, $E_s = E_b$. E_s - середня енергія сигналу, а E_b - середня енергія біта. Особливу увагу слід звернути на тонку різницю між модуляціями ASK і BPSK. У BPSK базовий сигнал приймає значення $+A$ і $-A$ замість $-A$ і нуля, як в ASK. Таким чином, фаза

вихідного сигналу для одиниці та нуля змінюється на протилежну, а не вмикається чи вимикається.

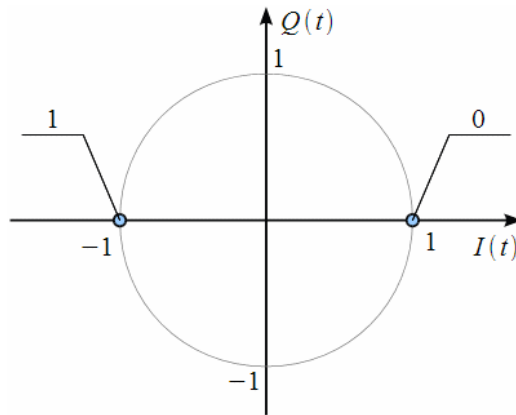


Рис. 2.5. Векторна діаграма BPSK сигналу

Обвідна BPSK сигналу:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n p(t - nT_s), \quad (2.2)$$

де $p(t)$ - імпульс формування одиничної амплітуди тривалістю T_s , а g_n - символ BPSK в n -му символному інтервалі $nT_s \leq t < (n+1)T_s$ який визначається виразом:

$$g_n = Ae^{j\phi_n}, \quad (2.3)$$

У наведеному вище виразі A являє собою загальну постійного символу BPSK, а ϕ_n являє собою фазу n -го символу, отриману як:

$$\phi_n = \begin{cases} 0, & \text{якщо } b_n = 0 \\ \pi, & \text{якщо } b_n = 1 \end{cases}, \quad (2.4)$$

2.2.3 Квадратурна фазова модуляція

У QPSK фаза несучої зсувається між чотирма положеннями, розташованими на 90 градусів одне від одного. На діаграмі I/Q канал I має чотири різні значення, як це зображено на рис. 2.6. На діаграмі стану є чотири можливі

розташування, тому можна надсилати всі можливі двійкові комбінації одиниці та нуля. Швидкість символу становить два біти на символ, $E_s = 2E_b$.

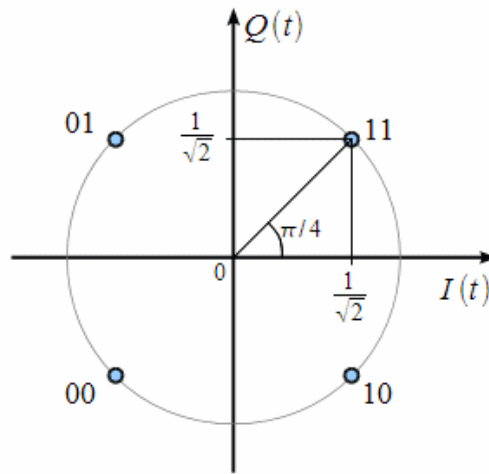


Рис. 2.6. Векторна діаграма QPSK сигналу

Зазвичай для виділення бітів символу використовується відображення Грея. Таким чином, сусідні символи відрізняються лише одним бітом. Це виходить шляхом обчислення фази n -го символу:

$$\phi_n = \begin{cases} \pi/4, & \text{якщо } b_{n-1} = 0 \cap b_n \\ 3\pi/4, & \text{якщо } b_{n-1} = 1 \cap b_n \\ 5\pi/4, & \text{якщо } b_{n-1} = 1 \cap b_n \\ 7\pi/4, & \text{якщо } b_{n-1} = 0 \cap b_n \end{cases}, \quad (2.6)$$

У M -PSK фаза несучої зсувається між M положеннями, розташованими в радіанах одна від одної:

$$\phi = (2i - 1) \frac{\pi}{M}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (2.7)$$

На діаграмі I/Q канал I має M різних значень. На діаграмі стану є M можливих місць, тому можна надсилати всі можливі двійкові комбінації одиниці та нуля. На рис. 2.7 зображена констеляційна діаграма схеми модуляції 8-PSK.

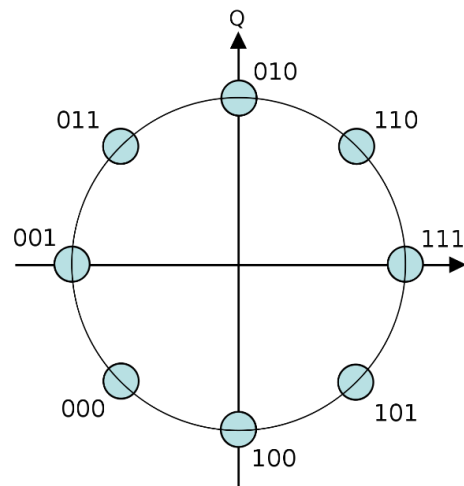


Рис. 2.7. Векторна діаграма 8-PSK сигналу

2.3 Радіоелектронне подавлення супутникової системи зв'язку з БПЛА

Радіоелектронне подавлення (РЕП) – це комплекс заходів та дій, спрямованих на зниження ефективності РЕЗ противника в інформаційному конфлікті аж до повного порушення роботи. Для протидії створюються завади радіоелектронним системам і засобам противника, застосовуються хибні цілі радіолокації і пастки, змінюються умови поширення електромагнітних хвиль.

2.3.1. Радіоелектронне подавлення висхідної та низхідної ліній зв'язку

Для цілей зв'язку використовують спеціальні військові супутники, які забезпечують захищені канали зв'язку від завад. Якщо ці захищені лінії зв'язку недоступні для збройних сил, тоді використовують незахищені урядові або комерційні супутники і ці сигнали зазвичай легше атакувати. Існують методи глушіння, які були розроблені для порушення ліній зв'язку в різних діапазонах, розташованих у мобільних, стаціонарних і морських системах.

Завданням подавлення тракту приймання даних є спотворення сигналів, що приймаються бортом БПЛА від ШСЗ, від НСК до ШСЗ. В якості завадових впливів можуть бути: прицільний (за частотою та спектром) шумовий процес, сигнал на робочій частоті із змінною фазою за законом цифрової модулюючої функції, псевдоімітуючий сигнал (реалізація процесу вимагає знання тактової частоти у формувачах псевдовипадкової послідовності, а також очікуваних значень доплерівських зміщень). Завади, що імітують сигнали передачі даних,

управління та телеметрії. Перші два завадні впливи вимагають підвищених енергетичних витрат. Третій завадний вплив є найбільш ефективним і відносно простим для технічної реалізації. Реалізація імітації здійснюється прийомом сигналів на робочих несучих частотах, підсилення їх та ретрансляції на тих же робочих частотах у бік бортової приймальної системи БПЛА, при попередньому збагаченні її рециркуляційними компонентами.

Завади висхідній лінії зв'язку(рис. 2.8) перешкоджають супутниковому транспортеру відрізнити сигнал завади від вихідного сигналу. Щоб такий метод був ефективним, джаммер (джерело завади) повинен знаходитися в полі зору антени супутника.

Завади в низхідній лінії зв'язку (рис. 2.9) спотворюють сигнали, що надходять від супутника до приймача. Щоб такий метод був ефективним, джаммер (джерело завади) повинен бути в безпосередній близькості від приймальної антени. Цей тип завад має бути достатньо потужним, щоб порушити прийом сигналу на наземному або користувацькому вузлі.

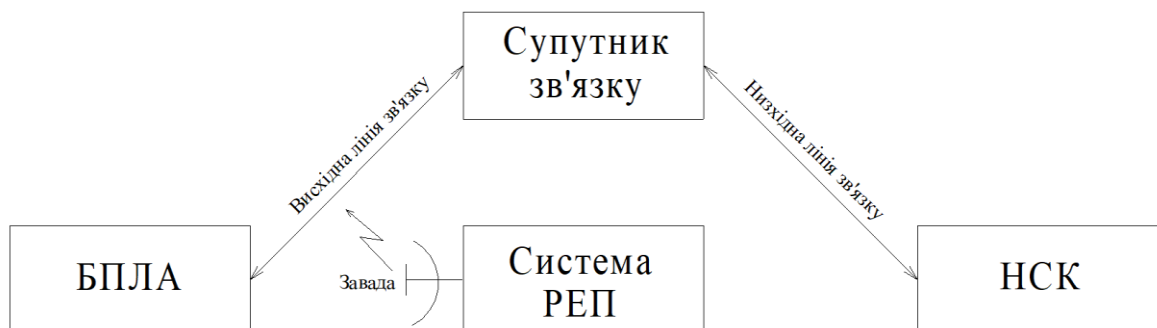


Рис. 2.8. Подавлення висхідної лінії зв'язку.

Через різні характеристики БПЛА вплив наземних засобів подавлення супутникового зв'язку відрізняється. Щоб подавлення на низхідному каналі було ефективним, генератор завад, повинен бути між супутником і антеною БПЛА. Таким чином, для висотних БПЛА тільки глушники космічного або повітряного базування мають можливість глушити низхідний канал супутникового зв'язку.

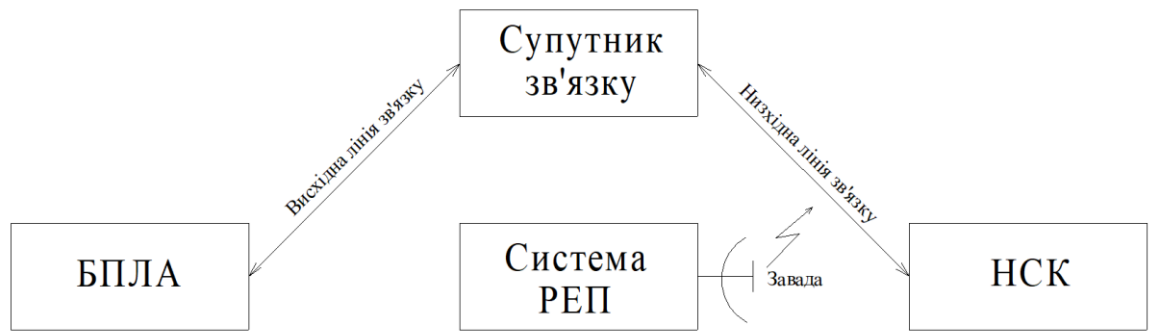


Рис. 2.9. Подавлення низхідної лінії зв'язку

2.3.2. Комплексний метод протидії БПЛА

Метод виявлення, аналізу та подавлення супутникових каналів керування, передачі даних телеметрії та навігації БПЛА є досить складним та потребує задіяння додаткових систем, які повинні працювати синхронно з системою радіоелектронного подавлення. Метод виявляє канали зв'язку БПЛА з його наземною станцією керування, канали супутникових навігаційних систем, лінії зв'язку БПЛА з іншим повітряним судном або супутником, що безпосередньо впливають на його льотні характеристики і в загальному на сигнали комунікацій БПЛА з будь-яким джерелом, яке впливає на управління/ навігацію / корисне навантаження / шляхові точки.

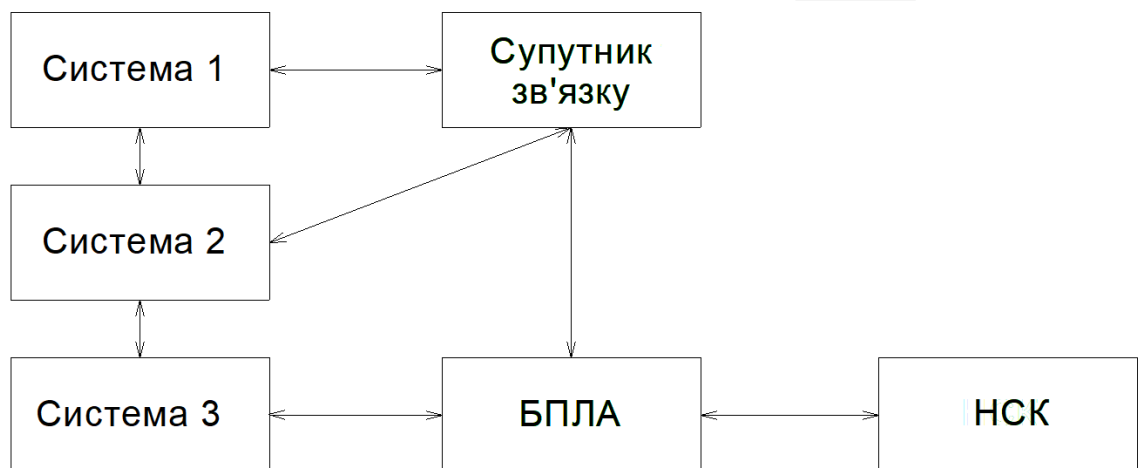


Рис. 2.10. Структурна реалізація методу боротьби з БПЛА, які працюють з ШСЗ

Запропонований метод структурно можна реалізувати згідно рис. 2.10.

На даній схемі під системою 1 розуміється, система моніторингу супутникових каналів зв'язку, яка визначає частотний діапазон в якому ведеться управління, передача даних, ширину каналу зв'язку, а також тип використовуваної модуляції сигналу, що необхідно для ефективного радіоелектронного подавлення.

Дана система повинна вести радіомоніторинг центральних каналів радіоуправління БПЛА в діапазонах L (1,4-1,85 ГГц), S (2,2-2,5 ГГц), C (4,4-5,85 ГГц), та Ku (15,15-15,35/14,4-14,83 ГГц), тобто в діапазоні частот від 1 до 15 ГГц.

Система 2 відповідає за постановку радіоелектронних завад. Для супутникових каналів зв'язку та управління це є прицільна та ковзна за частотою, а також загороджувальна по діапазону частот завади, а для каналу навігації по супутниковій навігаційній системі: прицільна за частотою та структурою сигналу з метою формування хибної навігаційної інформації (за відкритими частотами супутникових навігаційних систем) і шумова прицільна за частотою (за відкритими або закритими частотами супутникових навігаційних систем).

Система під номером 3 призначена для радіолокації БПЛА, ідентифікації, а також визначення супутників з якими працює безпілотний апарат.

2.3.3. Навмисні активні завади

За своєю структурою навмисні завади можуть бути шумовими або такими, що імітують сигнал. Шумові завади, подібно до шуму природного походження, маскують сигнал і тому відносяться до класу маскуючих. Шумові завади універсальні для застосування. При енергетичному перевищенні завади над сигналом вони можуть подавляти будь-який сигнал. Маскуючі завади спотворюють структуру сигналів, що приймаються, і ускладнюють (або повністю виключають) можливість виявлення сигналу і виділення інформації в приймальному пристрої, знижують точність вимірювання параметрів сигналів. Зі збільшенням потужності перешкод їхня маскувальна дія зростає. За співвідношенням областей значень параметрів завад і сигналів активні завади поділяють на загороджувальні і прицільні.

У загороджувальних завод області значень параметрів значно перевищують відповідні області сигналів. Так, загороджувальні за частотою заводи шириною спектра можуть значно перевищувати смугу частот, займану сигналом об'єкта протидії. Те саме справедливо і для завод, загороджувальних по кутах. Загороджувальні заводи можуть пригнічувати кілька РЕЗ одночасно без точного наведення параметрів заводи на відповідний параметр сигналу подавляемого РЕЗ. Отже, застосування завод не ставить серйозних вимог до оперативної радіотехнічної розвідки для підтримки РЕБ. Прицільні перешкоди імітують сигнал за деяким параметром. Зокрема, прицільні за частотою заводи мають ширину спектра, порівняно рівну з шириною спектра сигналу РЕЗ, що подавляється. Ефективність впливу імітуючої заводи залежить від точності суміщення за параметром(наприклад частотою) із сигналом і принаймні, вище ефективності загороджувальної заводи.

Оскільки, як розглянуто в підрозділі 2.2 для передачі даних телеметрії БПЛА використовуються широкосмугові (ШСС) фазоманіпульовані сигнали (QPSK, BPSK), які є складними сигналами з великою величиною бази, тобто сигналами, у яких добуток ширини спектра на тривалість набагато більший за одиниці. Такі сигнали часто називають шумоподібними. Часто у системах широкосмугового радіозв'язку можна зустріти використання зворотного зв'язку (ЗЗ) для корекції способів кодування та модуляції у разі виявлення заводи. Системи радіозв'язку з ЗЗ відрізняються тим, що відбувається перевірка якості переданих повідомлень, з корекцією на передавальному кінці.

Для подавлення систем радіозв'язку з ЗЗ необхідно ставити потужну загороджувальну заводу. Звідси випливає: для подавлення таких систем потрібно ставити загороджувальні за кодом заводи, або хаотично імпульсні заводи (ХІЗ), або ретрансляційні заводи.

2.3.4. Хаотична імпульсна завада

Імпульсні шумові заводи створюють шумовий імпульс більшої тривалості $\tau_{шз} \gg \tau_c$ у відповідь на кожен імпульс сигналу. Несуча частота заводи $f_{шз} \gg f_c$

у кожному імпульсі. Такий метод створення завад дозволить боротися з РЕЗ БПЛА, у яких несуча частота змінюється від імпульсу до імпульсу за невідомим для засобу РЕП законом.

Один із методів створення ХІЗ – запам'ятовування параметрів імпульсу сигналу τ^* , T_c^* , t_c^* і створення шумових імпульсів з параметрами τ^* , $T_{шз} = T_c^*$, $t_{шз} = t_c^*$ з незалежним генератором завад.

До імпульсних шумових завад відноситься так звана хаотична імпульсна завада (рис. 2.11.)

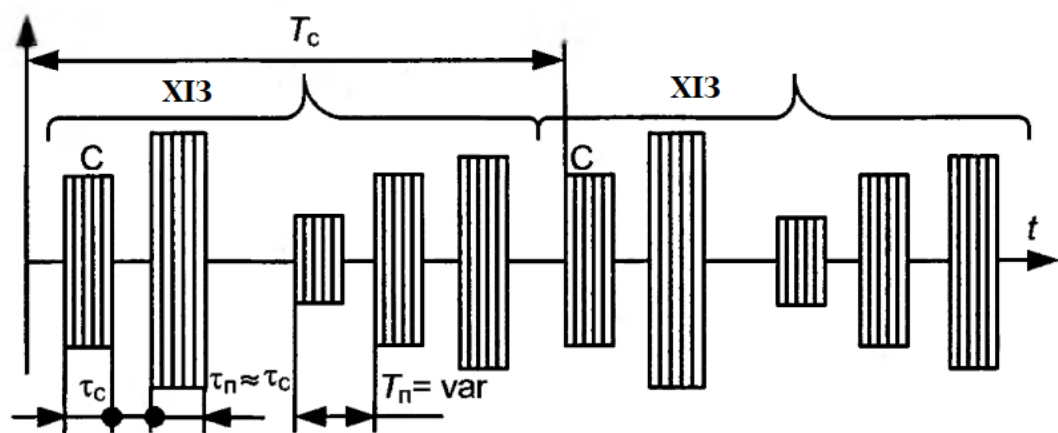


Рис. 2.11. Хаотична імпульсна завада

У відповідь на кожен імпульс сигналу з параметрами τ_c , T_c , генератор ХІЗ формує приблизно такі ж імпульси з тривалістю $\tau_c = \tau_s$, але з випадковим періодом повторення, в середньому значно меншим періоду проходження сигнальних імпульсів $T_{шз} \ll T_c$. Несучі частоти та форми імпульсів ХІЗ також мало відрізняються від імпульсів сигналу. Схема формування імпульсної шумової завади наведена на рис. 2.12, а осцилограми, що ілюструють її роботу – на рис. 2.13.

У прямому каналі пристрій оперативної радіотехнічної розвідки за допомогою високочастотної частини приймача (ПРМ) та пристрою запам'ятовування частоти (ПЗЧ) вимірює частоту несучої сигналу, формуючи оцінку f_c^* . Отримана таким чином оцінка використовується для синхронізації задаючого генератора, який формує коливання з частотою f_c^* . У нижньому за

схемою рис. 2.12 на каналі за допомогою аналізатора сигналу оцінюються параметри імпульсів τ_c^* , T_c^* . Ці оцінки дозволяють генератору ЗГ створити завади з параметрами $\tau_{шз} \gg \tau_c^*$, $T_{шз} \gg T_c^*$. Два модулятори МОД1 і МОД2 формують шумові імпульси зі смугою $\Delta f_{шз} = 2F_e$.

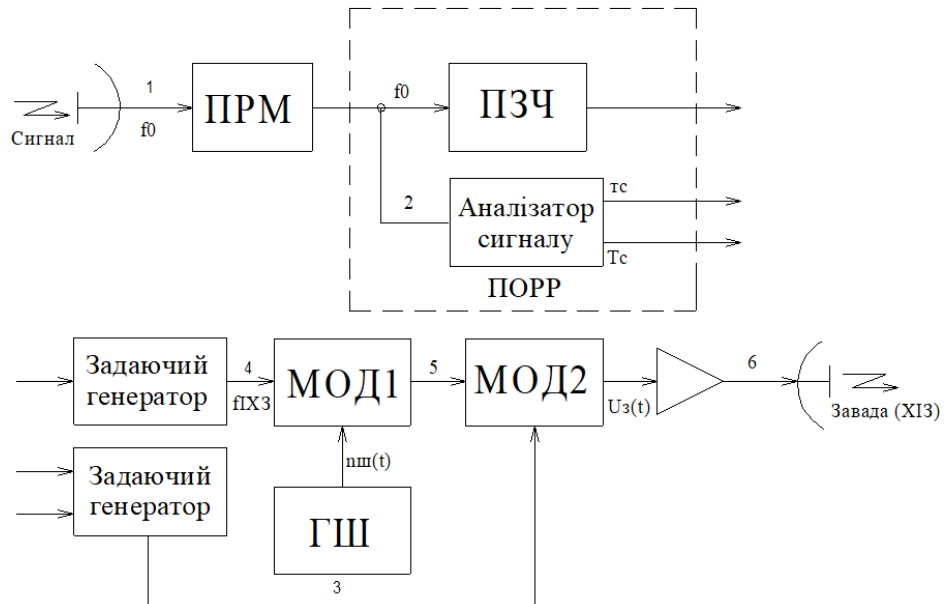


Рис. 2.12. Схема формування XI3

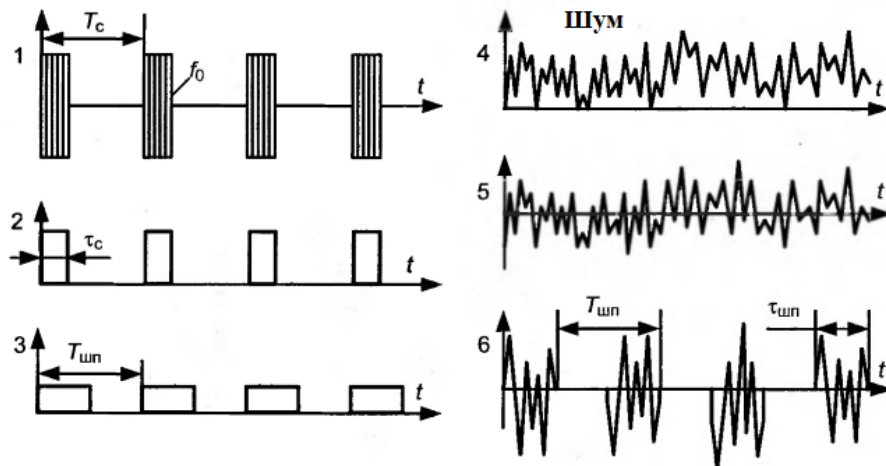


Рис. 2.13. Осцилограма, що ілюструє роботу схеми формування XI3

Для підвищення ефективності подавлення каналу телеметрії, в якості завади доцільно використати, заваду у вигляді хаотичної імпульсної послідовності з випадковою модуляцією і з швидкою перебудовою несучої частоти від імпульсу до імпульсу.

2.4. Дестабілізуючі фактори, які впливають на роботу комплексу протидії БПЛА

Розрахунок загального ослаблення радіохвиль:

$$L_p = L_0 + L_{\text{доод}}, \quad (2.3)$$

де L_0 - згасання сигналу у вільному просторі:

$$L_0 = 20 \lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right), \quad (2.4)$$

де d – дальність, λ - довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.5)$$

Слід мати на увазі, що на лінії “вгору” і “вниз” використовуються різні частоти, а d і λ треба підставляти в однакових одиницях вимірювання, наприклад в метрах.

$L_{\text{доод}}$ - додаткові втрати енергії радіохвиль при поширенні в реальних умовах:

$$L_{\text{доод}} = L_{\text{атм}} + L_{\text{д}} + L_{\text{н}} + L_{\text{п}}, \quad (2.6)$$

де $L_{\text{атм}}$ - втрати в спокійні атмосфері, дБ;

$L_{\text{д}}$ - втрати в опадах, дБ (в умовах «ясного неба» вважають $L_{\text{д}} = 0$);

$L_{\text{н}}$ - втрати через неточності наведення антен, дБ;

$L_{\text{п}}$ - поляризаційні втрати, дБ.

Величина $L_{\text{доод}}$ залежить від робочої частоти, кута місця, характеристик антен і систем їх наведення. Крім цього, втрати в опадах залежать від кліматичного району, в якому знаходиться ЗС, і змінюються в часі.

2.4.1. Втрати у спокійні атмосфері

Виникають через поглинання сигналу в кисні та водяних парах і можуть бути розраховані за методикою рекомендацій ІТУ-R або визначені за графіками.

Виникають через поглинання сигналу в кисню та водяних парах і можуть бути розраховані за методикою рекомендацій ІТУ-R або визначенні за графіками.

У табл. 2.6 наведено значення $L_{атм}$ в дБ для діапазонів частот, що найчастіше використовуються.

Таблиця 2.6

Втрати сигналу у спокійній атмосфері

Кут місця, град.	5°	10°	45°	90°
Частота, ГГц	Втрати в спокійній атмосфері, дБ			
4	0,6	0,25	0,1	0,06
11	1,1	0,6	0,15	0,1
20	7,0	3,0	0,8	0,5

2.4.2. Втрати через неузгодженість поляризації антен

У ССЗ застосовують як кругову (на частотах до 10 ГГц обов'язково), так і лінійну (вище 10 ГГц) поляризацію хвиль [40]. Втрати виникають при розбіжності параметрів поляризації приймальної антени і хвилі в точці приймання (наприклад, кутів повороту площини поляризації у разі лінійної поляризації або різної еліптичності у разі кругової поляризації, деполіризації радіохвиль в опадах). Насправді вдається звести ці втрати до величини 0,2 ... 0,5 дБ.

2.4.3. Втрати через неточність наведення антен

Втрати через неточність наведення антен ЗС на ШСЗ визначаються кутовим відхиленням осі головної пелюстки ДН від справжнього напрямку на ШСЗ, а також шириною та формою головної пелюстки ДН антени. Для зниження цих втрат антени великого діаметра забезпечуються системами точного

автоматичного наведення на ШСЗ. У існуючих системах втрати наведення становлять 0,15...0,3 дБ. Для розрахунків L_n вибирають значення в цих межах.

2.4.4. Розрахунок втрат у дощі

Втрати L_o пов'язані з поглинанням і розсіюванням енергії радіохвиль краплями дощу і можуть бути розраховані (за відсутності виміряних для даної місцевості значень) відповідно до рекомендації *ITU-R P.838-3*.

Для розрахунку необхідні такі вихідні дані [40]:

- координати ЗС - $\varphi_{ЗС}$ – широта (додатна для Північної півкулі і від'ємна для Південної), $\lambda_{ЗС}$ – довгота, $h_{ЗС}$ – висота над рівнем моря (в км);
- робоча частота – f , кут місця – β ;
- відсоток часу місяця (або року), для якого визначаються втрати – $T_{\text{міс}}$ (або $T_{\text{року}}$).

Методика включає наступні кроки:

1. Визначається ефективна висота дощової зони h_o :

$$h_o = \begin{cases} 5 - 0,075(\varphi_{ЗС} - 23) & , \text{для } \varphi_{ЗС} \geq 23^\circ & \text{Північна півкуля} \\ 5 & , \text{для } 0^\circ \leq \varphi_{ЗС} \leq 23^\circ & \text{Північна півкуля} \\ 5 & , \text{для } 0^\circ \geq \varphi_{ЗС} \geq -21^\circ & \text{Південна півкуля} \\ 5 + 0,1(\varphi_{ЗС} + 21) & , \text{для } -21^\circ \geq \varphi_{ЗС} \geq -71^\circ & \text{Південна півкуля} \\ 0 & , \text{для } \varphi_{ЗС} < -71^\circ & \text{Південна півкуля} \end{cases} \quad (2.7)$$

2. Визначається шлях сигналу в дощі l_s :

$$l_s = \frac{h_o - h_{ЗС}}{\sin \beta}, \quad (2.8)$$

3. Розраховується горизонтальна проекція l_g :

$$l_g = \frac{l_s}{\cos \beta}, \quad (2.9)$$

Формули (2.8-2.9) справедливі для $\beta \geq 5^\circ$.

4. За картами рекомендації R-837 ITU-R (див. рис. 2.14) визначається дощова кліматична зона (позначена латинською буквою від А до Q), в яку потрапляє земна станція ЗС.



Рис. 2.14. Розміщення України в кліматичних зонах

З табл. 2.7 знаходиться значення $R_{0,01}$ – інтенсивності дощу в мм/год, що перевищується у цій зоні протягом 0,01 % пори року.

Таблиця 2.7

Значення $R_{0,01}$ (мм/год) для дощових кліматичних зон

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115

Розраховується коефіцієнт зменшення $r_{0,01}$, який враховує просторову нерівномірність дощу:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{g}{l_0}\right)}, \quad (2.10)$$

де l_0 - опорна відстань, залежна від $R_{0,01}$:

$$l_0 = 35e^{(-0,015R_{0,01})}, \quad (2.11)$$

6. У відповідності з рекомендацією R-838 ITU-R розраховується питоме згасання сигналу в дощі γ_r , дБ/км.

Воно залежить від робочої частоти f , виду поляризації хвилі і інтенсивності дощу [40]:

$$\gamma_r = k(R_{0,01})^\alpha, \quad (2.12)$$

де коефіцієнти k і α розраховуються за формулами:

$$k = \frac{(k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos 2\tau)}{2}, \quad (2.13)$$

$$\alpha = \frac{(k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos 2\tau)}{2k}, \quad (2.14)$$

де β - кут місця, τ - кут нахилу площини поляризації до горизонту (при круговій поляризації $\tau = 45^\circ$). Коефіцієнти k_H , α_H , k_V , α_V визначаються з табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Коефіцієнти регресії для оцінки питомого згасання у дощі

f , ГГц	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000
40	0,350	0,310	0,939	0,929

2.5. Висновки до розділу 2

Здійснено аналіз частотних діапазонів та типів модульованих сигналів, які використовуються для утворення каналів управління, навігації та передачі даних телеметрії.

Для підвищення ефективності радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку з БПЛА запропоновано структуру методу протидії безпілотним апаратам, а також використовувати хаотичну імпульсну заваду, що дозволить вести боротьбу з засобами зв'язку БПЛА, у яких несуча частота змінюється від імпульсу до імпульсу за невідомим для засобу радіоелектронного подавлення законом.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Оцінка впливу дестабілізуючих факторів на роботу комплексу протидії БПЛА

Для утворення каналів радіоуправління, передачі даних та телеметрії БПЛА, через супутникові системи зв'язку, зазвичай, використовуються системи Iridium, Inmarsat, SpaceX, GlobalStar утворюються в L, S, C, Ku діапазонах, а також Ka-діапазон в окремих випадках.

У табл. 3.1. наведено частоти даних діапазонів, а також довжини хвиль.

Таблиця 3.1

Частотні діапазони і довжини хвиль

№	Діапазон	Частота, ГГц	Довжина хвилі, мм
1.	L	1-2	300-150
2.	S	2-4	150-75
3.	C	4-8	75-37
4.	Ku	12-18	25-17
5.	Ka	26.5-40	11-7.5

Оцінку втрат розповсюдження радіосигналу проводимо в діапазоні частот 1 ГГц – 50 ГГц за допомогою Signal Propagation Targets, в якій можна в інтерактивному режимі виконувати аналіз втрат розповсюдження сигналу зв'язку та оцінювати компроміси проектування системи.

3.2. Втрати сигналу у дощі

3.2.1. Втрати сигналу в дощі за моделлю ITU - R

Для оцінки згасання сигналу у дощі використовується функція $L = \text{rainpl}(\text{range}, \text{freq}, \text{gainrt})$, яка повертає ослаблення сигналу через дощ. У цьому синтаксисі згасання є функцією довжини шляху сигналу, діапазону частот сигналу та інтенсивності дощу. Кут піднесення траєкторії та кути нахилу поляризації вважаються нульовими.

Оскільки, у відповідності до карти (див. рис.2.8) рекомендацій R - 837 ITU-R, Україна знаходиться у трьох кліматичних зонах: Н, Е, К. Відповідно до табл. 2.7 – це є інтенсивності дощу: 22 мм/год, 32 мм/год, 42 мм/год.

На рис. 3.1 наведено лістинг коду для оцінки втрат сигналу в дощі за моделлю ITU-R.

```

1 - rr = 22.0; % інтенсивність опадів 22 мм/год
2 - rrl=32.0; % інтенсивність опадів 5 мм/год
3 - rr2 = 42.0; % інтенсивність опадів 10 мм/год
4 - freq = [1:50]*1e9; % частотний діапазон 1-50 ГГц
5 - R=10000; % шлях проходження сигналу 10 км
6 - L = rainpl(R,freq,rr); % функція розрахунку втрат
7 - semilogx(freq/1e9,L) % побудова графіку
8 - grid
9 - hold on
10 - L = rainpl(R,freq,rr1);
11 - semilogx(freq/1e9,L) |
12 - hold on
13 - L = rainpl(R,freq,rr2);
14 - semilogx(freq/1e9,L)
15 - grid on
16 - xlabel('Частота (ГГц)')
17 - ylabel('Згасання сигналу (дБ)')

```

Рис. 3.1. Код програми для розрахунку втрати сигналу при різних інтенсивностях дощу і частотах сигналу за моделлю ITU-R

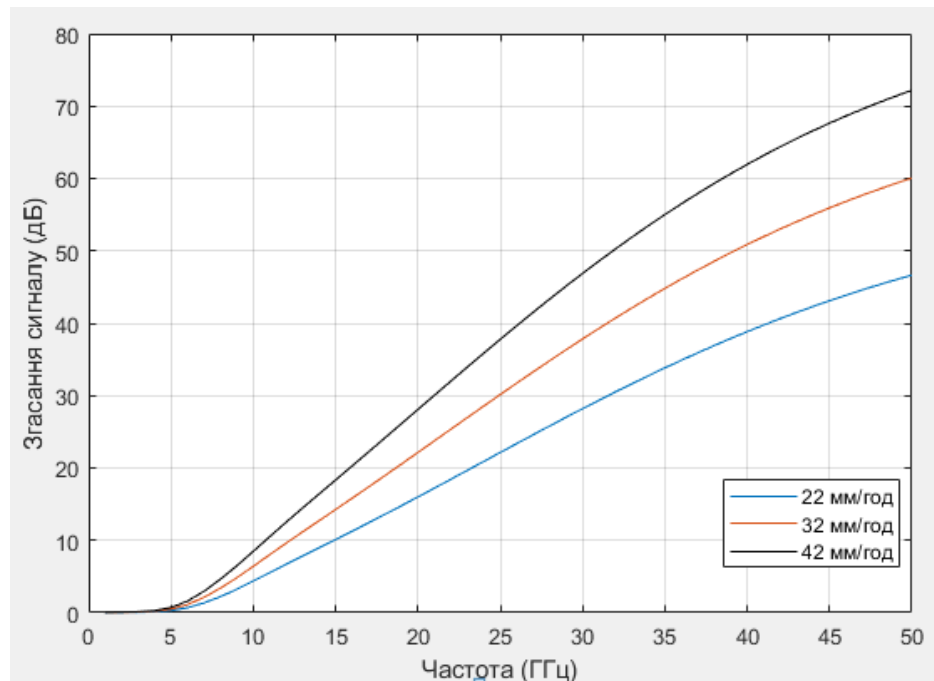


Рис. 3.2. Втрати сигналу в залежності від інтенсивності дощу і частоти сигналу 1-50 ГГц

На рис. 3.2 показано залежність втрат сигналу при проходженні крізь дощ для діапазону частот 1-50 ГГц, при довжині шляху сигналу 10 000 м за моделлю ITU-R.

З наведеного графіку, можна побачити, що втрати сигналу збільшуються, з ростом частоти, тобто зі зменшенням довжини хвилі. В діапазоні 1-5 ГГц, втрати не перевищують 1-2 дБ. Значні втрати розпочинаються на частоті 10 ГГц і зростають зі збільшенням частоти.

3.2.2. Втрати сигналу в дощі за моделлю Crane

На рис. 3.3 наведено лістинг коду для оцінки втрат сигналу в дощі за моделлю Crane.

```

1 - rr = 22.0; % інтенсивність опадів 22 мм/год
2 - rrl=32.0; % інтенсивність опадів 5 мм/год
3 - rr2 = 42.0; % інтенсивність опадів 10 мм/год
4 - freq = [1:50]*1e9; % частотний діапазон 1-50 ГГц
5 - R=10000; % шлях проходження сигналу 10 км
6 - L = cranerainpl(R,freq,rr); % функція розрахунку втрат
7 - semilogx(freq/1e9,L) % побудова графіку
8 - grid
9 - hold on
10 - L = cranerainpl(R,freq,rr1);
11 - semilogx(freq/1e9,L)
12 - hold on
13 - L = cranerainpl(R,freq,rr2);
14 - semilogx(freq/1e9,L)|
15 - grid on
16 - xlabel('Частота (ГГц)')
17 - ylabel('Згасання сигналу (дБ)')
```

Рис. 3.1. Код програми для розрахунку втрати сигналу при різних інтенсивностях дощу і частотах сигналу за моделлю Crane

$L = \text{cranerainpl}(\text{range}, \text{freq}, \text{rainrt})$ розраховує втрати сигналу через дощ на основі моделі Crane. Ослаблення сигналу є функцією довжини шляху сигналу, діапазону, частоти сигналу і інтенсивності дощу,. Норма дощу визначається як довгострокова статистична норма дощу. Модель ослаблення застосовується лише для частот від 1 ГГц до 1000 ГГц і дійсна для діапазонів до 22,5 км.

На рис. 3.4 проілюстровано залежність втрат сигналу в дощі для діапазону частот 1-50 ГГц, при довжині шляху сигналу 10 000 м за моделлю Crane.

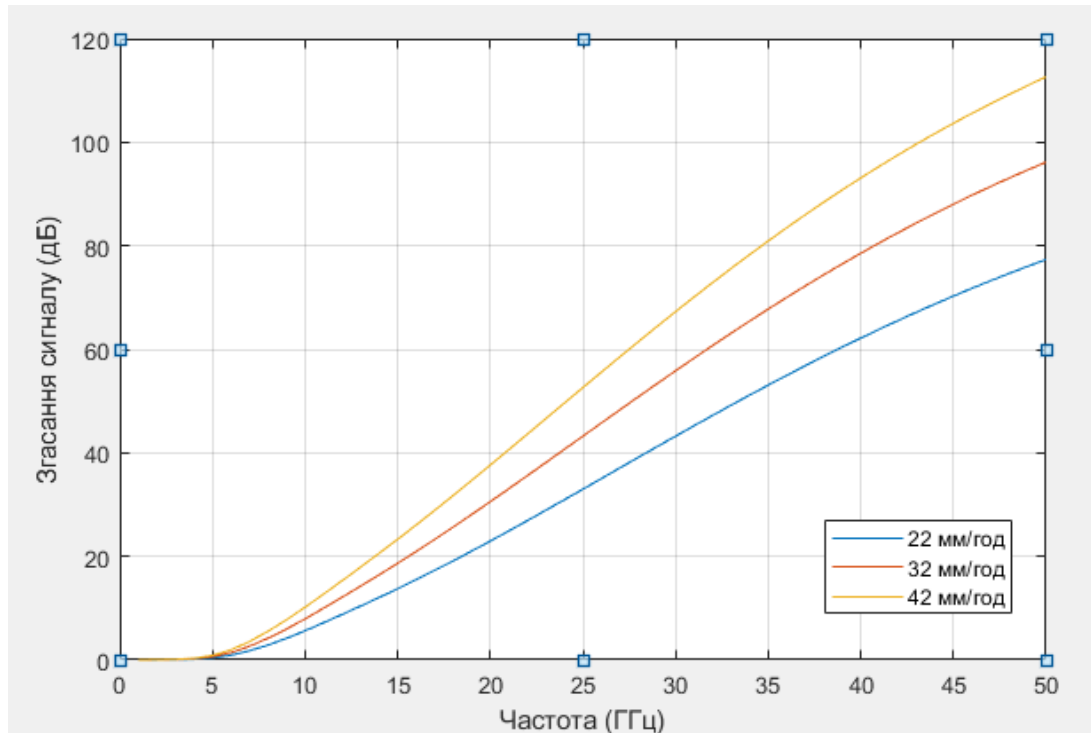


Рис. 3.4. Залежність втрат сигналу при проходженні через дощ від частоти сигналу 1-50 ГГц за моделлю Crane

3.3. Втрати сигналу в атмосферних газах

Функція `gaspl` застосовує модель ослаблення атмосферних газів Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) для розрахунку втрат на трасі для сигналів, головним чином через кисень і водяну пару. Модель обчислює згасання як функцію температури навколишнього середовища, тиску, щільності водяної пари та частоти сигналу.

$L = \text{gaspl}(\text{range}, \text{freq}, T, P, \text{den})$ розраховує згасання, сигналів, що поширюються через атмосферу. `Range` представляє довжину шляху сигналу, `freq` представляє несучу частоту сигналу. `T` означає температуру навколишнього середовища. `P` означає атмосферний тиск. `den` представляє густину водяної пари в атмосфері.

На рис. 3.5 наведено лістинг коду для оцінки втрат сигналу в атмосферних газах за моделлю ITU-R.

```

1 - T = 20.0; % температура навколишнього середовища
2 - Patm = 101.325e3; % нормальний атмосферний тиск
3 - rho_wv = 10; % відносна вологість повітря 10%
4 - rho_wv1 = 20; % відносна вологість повітря 20%
5 - rho_wv2 = 30; % відносна вологість повітря 30%
6 - rho_wv3 = 40; % відносна вологість повітря 40%
7 - rho_wv4 = 50; % відносна вологість повітря 50%
8 - km = 10;
9 - c = physconst('LightSpeed');
10 - freqs = [1:70]*1e9;
11 - loss = gaspl(km, freqs, T, Patm, rho_wv);
12 - loss1 = gaspl(km, freqs, T, Patm, rho_wv1);
13 - loss2 = gaspl(km, freqs, T, Patm, rho_wv2);
14 - loss3 = gaspl(km, freqs, T, Patm, rho_wv3);
15 - loss4 = gaspl(km, freqs, T, Patm, rho_wv4);
16 - semilogy(freqs/1e9, loss)
17 - hold on
18 - semilogy(freqs/1e9, loss1)
19 - semilogy(freqs/1e9, loss2)
20 - semilogy(freqs/1e9, loss3)
21 - semilogy(freqs/1e9, loss4)
22 - grid on
23 - xlabel('Частота (ГГц)')
24 - ylabel('Загасання сигналу (дБ/км)')

```

Рис. 3.5. Код програми для розрахунку втрат сигналу в атмосферних газах

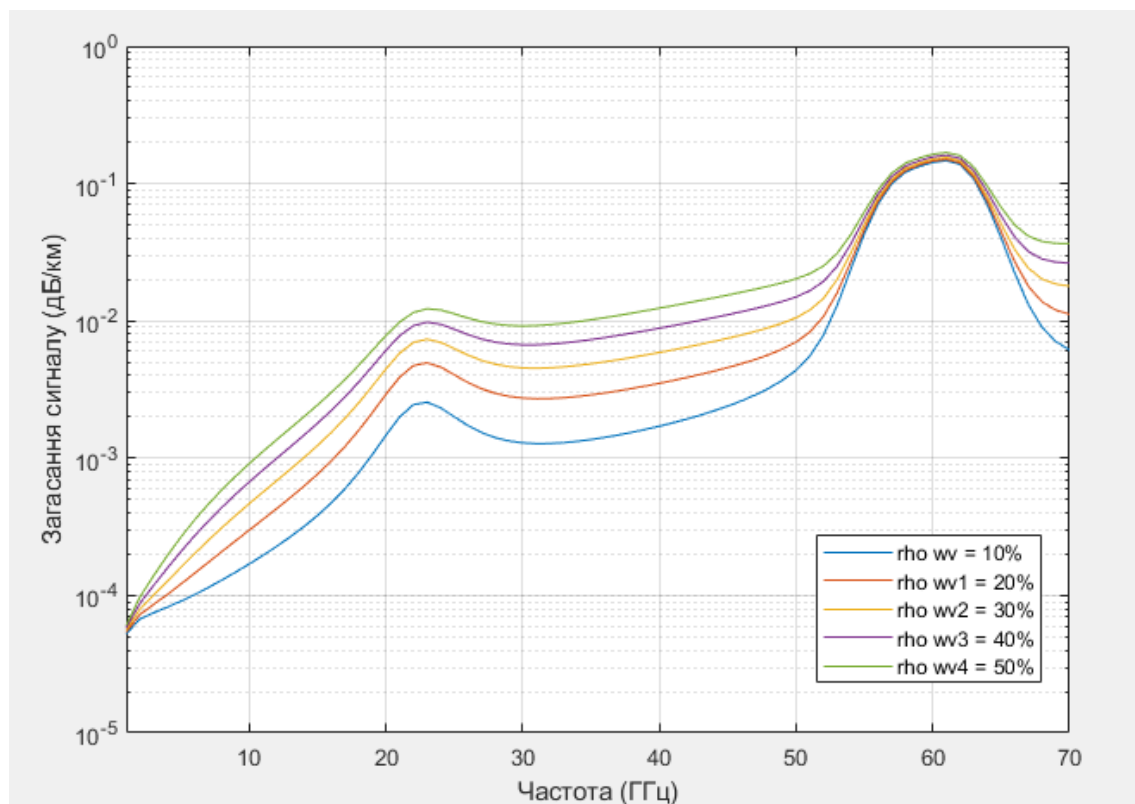


Рис. 3.6. Втрати сигналу в атмосферних газах для діапазону частот 1-70 ГГц.

На рис. 3.6 показано залежність втрат сигналу в атмосферних газах для діапазону частот 1-70 ГГц, при довжині шляху сигналу 10000 м, температурі навколишнього середовища 20°C, нормальному атмосферному тиску 760 мм. рт.ст. (103 325 Па).

Значне питоме згасання починається на частотах вище 20 ГГц переважно за рахунок дії кисню, а потім рівень згасання знижувався. Ефект знову з'являється на частотах вище 55 ГГц і досягає піку на частоті 60 ГГц, але цього разу переважно через затухання у водяній парі.

Згасання в газах при фіксованій відносній вологості 50% досягло вищого рівня приблизно на частоті 60 ГГц. При збільшенні вологості втрати сигналу збільшуються, тому можна зробити висновок, що рівень відносної вологості прямо пропорційний ступеню згасання потужності сигналу через частинки водяної пари в просторі.

3.4. Втрати сигналу в тумані та хмарах

На рис. 3.7 показано програмний код для обчислення затухання сигналу в хмарах і туман з використанням функції $\text{fogpl}(R, \text{frq}, T, de)$, обчислює ослаблення, коли сигнали поширюються в тумані або хмарах. R представляє довжину шляху сигналу, frq – несуча частота сигналу, T – температура навколишнього середовища, а de – густина рідкої води в тумані чи хмарі.

На рис. 3.8 показано залежність втрат сигналу при проходженні через туман та хмари для діапазону частот 1-50 ГГц, при довжині шляху сигналу 10 000 м, температурі навколишнього середовища 20 °C.

Як видно з рис. 3.8. згасання сигналу в хмарах/тумані прямо пропорційне густині рідкої води в хмарі. Значні втрати сигналу починають спостерігатися на частоті 10 ГГц і зростають з збільшенням частоти.

```

1 - R = 10000.0; % довжина шляху сигналу
2 - freq = [10:5:50]*1e9; % частотний діапазон
3 - T = 20.0; % температура навколишнього середовища
4 - lwd = 0.5; % густина рідкої води 0.5 г/м3
5 - lwd1 = 1.0; % густина рідкої води 1 г/м3
6 - lwd2 = 2.0; % густина рідкої води 2 г/м3
7 - lwd3 = 3.0; % густина рідкої води 3 г/м3
8 - lwd4 = 4.0; % густина рідкої води 4 г/м3
9 - lwd5 = 5.0; % густина рідкої води 5 г/м3
10 - L = fogpl(R, freq, T, lwd);
11 - loglog(freq/1e9, L)
12 - hold on
13 - L = fogpl(R, freq, T, lwd1);
14 - loglog(freq/1e9, L)
15 - L = fogpl(R, freq, T, lwd2);
16 - loglog(freq/1e9, L)
17 - L = fogpl(R, freq, T, lwd3);
18 - loglog(freq/1e9, L)
19 - L = fogpl(R, freq, T, lwd4);
20 - loglog(freq/1e9, L)
21 - L = fogpl(R, freq, T, lwd5);
22 - loglog(freq/1e9, L)
23 - hold off
24 - grid
25 - xlabel('Частота (ГГц)')
26 - ylabel('Згасання сигналу (дБ/км)')

```

Рис. 3.7. Скрипт програми для обчислення ослаблення сигналу в тумані / хмарах

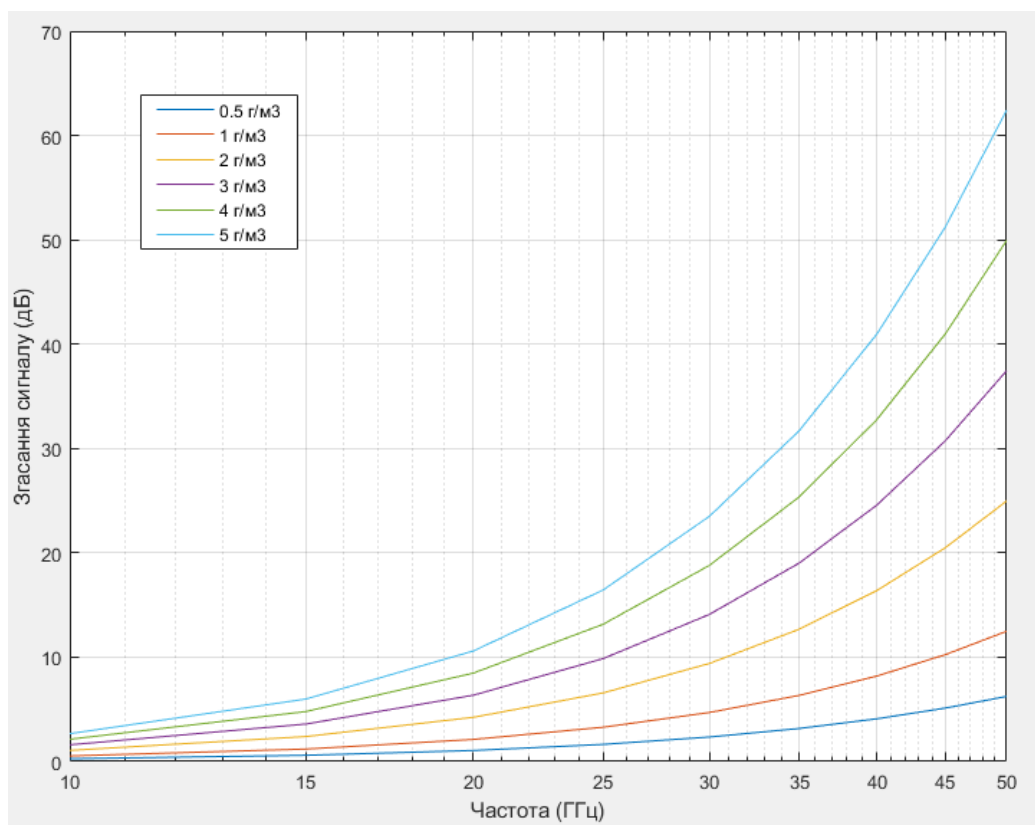


Рис. 3.8. Втрати сигналу при проходженні через туман/хмари

3.5. Втрати сигналу при розповсюдженні крізь сніг

Скрипт програми для визначення ослаблення сигналу представлений на рис. 3.9.

```

1 -   freq = (1:20)*1e9; % частотний діапазон
2 -   R0 = 10e3;         % 10 км відстань
3 -   snowrate = [0.1 1.5 4]; % інтенсивність снігу
4
5 -   for m = 1:numel(snowrate)
6 -       snowloss(:,m) = snowpl(R0,freq,snowrate(m));
7 -   end
8 -   loglog(freq/1e9,snowloss);
9 -   grid on;
10 -  legend('Легкий сніг','Помірний сніг','Сильний сніг', ...
11 -        'Location','SouthEast');
12 -  xlabel('Частота (ГГц)');
13 -  ylabel('Ослаблення сигналу (дБ)')

```

Рис. 3.9. Ослаблення сигналу при проходженні крізь сніг.

На рис. 3.10 показано залежність втрат сигналу при проходженні через сніг для діапазону частот 1-20 ГГц, при довжині шляху сигналу 10 000 м.

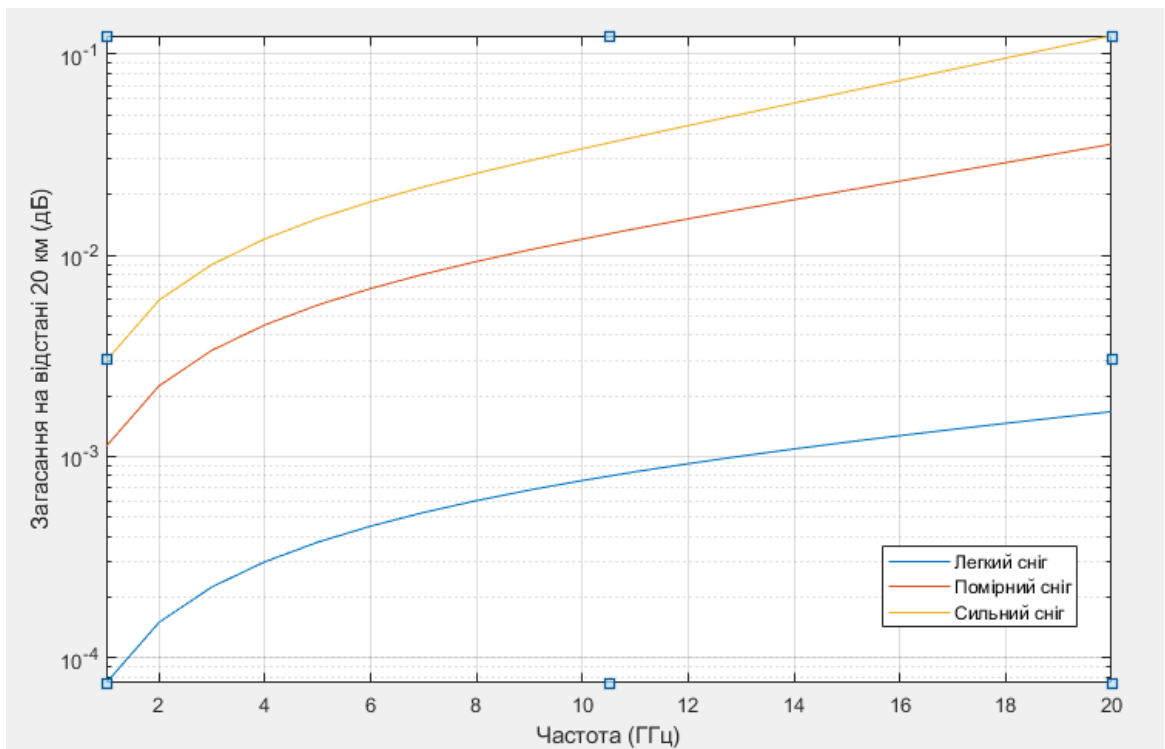


Рис. 3.10. Втрати сигналу при проходженні через сніг

3.6. Втрати вільного простору

Для оцінки втрат використовується функція `fsp1(R,lam)`, яка розраховує втрати на шляху вільного простору в децибелах для хвилі з довжиною хвилі λ , що поширюється на відстань R метрів. Мінімальне значення дорівнює нулю, що вказує на відсутність втрат на шляху.

Скрипт програми для визначення ослаблення сигналу у вільному просторі представлений на рис. 3.11.

```

1 - fc1 = 1e9; % частота 1 ГГц
2 - fc2 = 5e9;% частота 5 ГГц
3 - fc3 = 10e9;% частота 10 ГГц
4 - fc4 = 15e9;% частота 15 ГГц
5 - fc5 = 20e9;% частота 20 ГГц
6 - fc6 = 30e9;% частота 30 ГГц
7 - fc7 = 40e9;% частота 40 ГГц
8 - fc8 = 50e9; % частота 50 ГГц
9 - lambda1 = physconst('LightSpeed')/fc1; %переведення в довжину хвилі
10 - lambda2 = physconst('LightSpeed')/fc2; %переведення в довжину хвилі
11 - lambda3 = physconst('LightSpeed')/fc3; %переведення в довжину хвилі
12 - lambda4 = physconst('LightSpeed')/fc4; %переведення в довжину хвилі
13 - lambda5 = physconst('LightSpeed')/fc5; %переведення в довжину хвилі
14 - lambda6 = physconst('LightSpeed')/fc6; %переведення в довжину хвилі
15 - lambda7 = physconst('LightSpeed')/fc7; %переведення в довжину хвилі
16 - lambda8 = physconst('LightSpeed')/fc8; %переведення в довжину хвилі
17 - R = [0:10e3]; %довжина траси
18 - L1 = fsp1(R,lambda1) % функція розрахунку
19 - plot(R,L1)
20 - hold on
21 - L2 = fsp1(R,lambda2)
22 - L3 = fsp1(R,lambda3)
23 - L4 = fsp1(R,lambda4)
24 - L5 = fsp1(R,lambda5)
25 - L6 = fsp1(R,lambda6)
26 - L7 = fsp1(R,lambda7)
27 - L8 = fsp1(R,lambda8)
28 - plot(R,L2)
29 - plot(R,L3)
30 - plot(R,L4)
31 - plot(R,L5)
32 - plot(R,L6)
33 - plot(R,L7)
34 - plot(R,L8)
35 - grid on
36 - xlabel('Відстань (м)')
37 - ylabel('Втрати вільного простору (дБ)')
38 - hold off

```

Рис. 3.11. Лістинг програми для оцінки втрат вільного простору

На рис. 3.12 показано залежність втрат вільного простору для частот 1 ГГц, 5 ГГц, 10 ГГц, 15 ГГц, 20 ГГц, 30 ГГц, 40 ГГц, 50 ГГц, 100 при довжині шляху сигналу 10 000 м.

Як видно з рис. 3.12 втрати збільшуються при зростанні частоти сигналу.

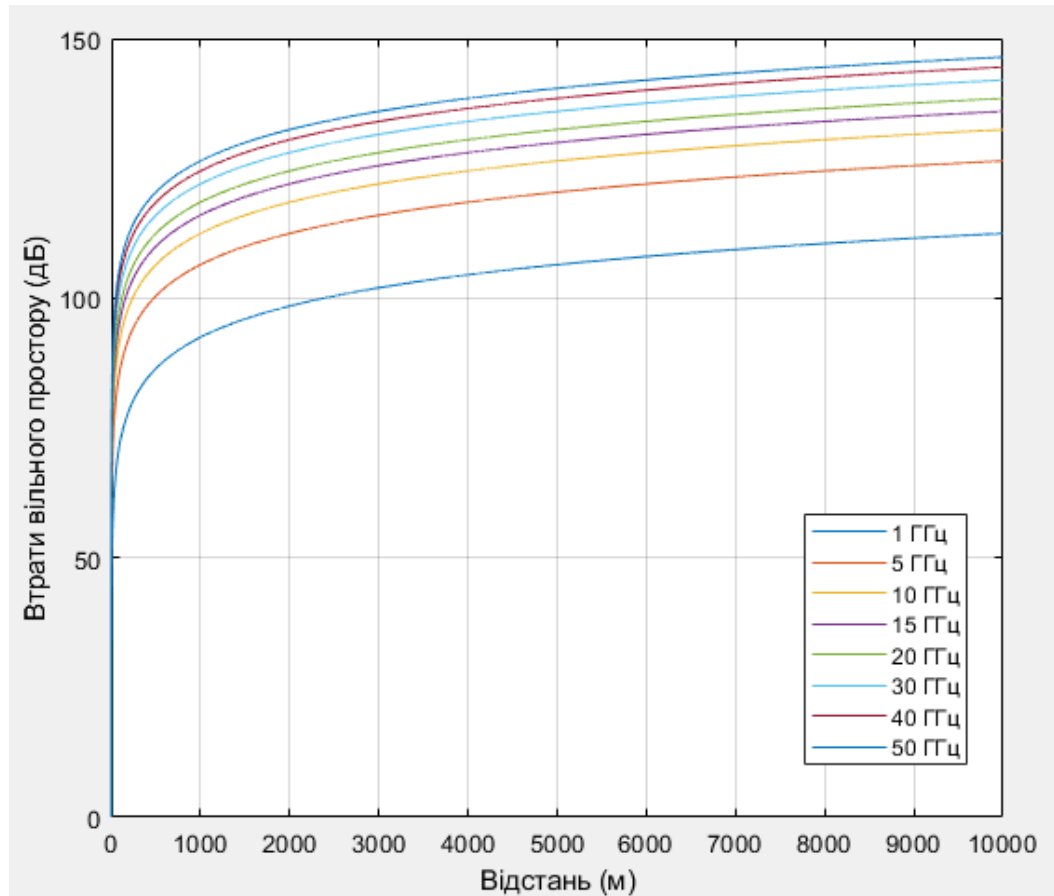


Рис. 3.12. Втрати вільного простору

3.7. Висновки до розділу 3

Розроблено засіб оцінки дестабілізуючих факторів на систему протидії БПЛА, а саме втрати сигналу при проходженні в атмосфері з допомогою програмного пакету MATLAB, що дозволить спростити розрахунки при проектуванні комплексів РЕП та РЕБ

Оцінено втрати сигналу в частотному діапазоні 1 - 50 ГГц, а саме згасання сигналу при проходженні крізь дощ, туман, сніг, хмари, атмосферні гази та втрати вільного простору.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

При проектуванні і будівництві виробничих будівель і споруд необхідно враховувати категорію приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Визначення категорії приміщення проводиться з урахуванням показників пожежевибухонебезпечності речовин та матеріалів, що там знаходяться, та їх кількості. Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 “Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою” приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою поділяються на п’ять категорій А, Б, В, Г, Д.

Категорія А (вибухопожеженебезпечна). Горючі гази, легкозаймисті рідини (ЛЗР) з температурою спалаху не більше 28°C в такій кількості, що можуть утворюватися вибухонебезпечні парогазоповітряні суміші, при спалахуванні яких розвивається розрахунковий надлишковий тиск вибуху $P > 5$ кПа. Речовини та матеріали, здатні вибухати та горіти при взаємодії з водою, киснем повітря або одне з одним в такій кількості, що розрахунковий надлишковий тиск вибуху $P > 5$ кПа.

До приміщень категорії А належать склади балонів з горючими газами, склади ЛЗР, склади карбїду кальцію, малярні цехи, де використовуються нітрофарби, лаки та нітроемалі.

Категорія Б (вибухопожеженебезпечна). Горючий пил або волокна, ЛЗР з температурою спалаху більше 28°C та горючі рідини в такій кількості, що можуть утворюватися вибухонебезпечні пилоповітряні або пароповітряні суміші, при спалахуванні котрих розвивається розрахунковий надлишковий тиск вибуху $P > 5$ кПа.

До категорії Б належать кисневі станції, малярні цехи, де використовують оліфу та олійні лаки, склади гасу, нафти, мазуту тощо.

Категорія В (пожежонебезпечна). Горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали (у тому числі пил і волокна), здатні при взаємодії з водою, киснем повітря або одне з одним лише горіти за умови що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А і Б.

До категорії В належать паливно-мастильні склади, деревообробні цехи, склади вугілля, приміщення обчислювальних центрів, цехи складання печатних плат.

Категорія Г. Негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюють або утилізують як паливо.

До категорії Г належать кузні, котельні, ливарні, зварювальні і термічні цехи.

Категорія Д. Негорючі речовини та матеріали в холодному стані.

До категорії Д належать механічні майстерні, цехи холодної обробки металу, повітродувні станції, склади металу.

Головним заходом запобігання пожеж і вибухів від електрообладнання є правильний вибір і експлуатація обладнання у вибухо- і пожежонебезпечних приміщеннях.

Класифікація пожежонебезпечних та вибухонебезпечних зон визначається НПАОП40.1-1.32-01 “Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок”.

Характеристика пожеже- та вибухонебезпеки може бути загальною для усього приміщення або різною в окремих його частинах. Це також стосується надвірних установок і ділянок територій. Приміщення, або їх окремі зони поділяються на пожежонебезпечні та вибухонебезпечні. Залежно від класу зони здійснюється вибір виконання електроустановок таким чином, щоб під час їх експлуатації виключити можливість виникнення вибуху або пожежі від теплового прояву електроструму.

Пожежонебезпечна зона – простір у приміщенні або за його межами, у якому постійно або періодично знаходяться (зберігаються, використовуються або виділяються під час технологічного процесу) горючі речовини як при нормальному технологічному процесі, так і при його порушенні в такій кількості, яка вимагає спеціальних заходів у конструкції електрообладнання під час його монтажу та експлуатації.

Пожежонебезпечна зона класу П-I – простір у приміщенні, у якому знаходиться горюча рідина, яка має температуру спалаху більше $+61^{\circ}\text{C}$.

Пожежонебезпечна зона класу П-II – простір у приміщенні, у якому можуть накопичуватися і виділятися горючий пи́л або волокна.

Пожежонебезпечна зона класу П-Ia – простір у приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали.

Пожежонебезпечна зона класу П-III – простір поза приміщенням, в якому знаходяться горюча рідина, яка має температуру спалахування понад $+61^{\circ}\text{C}$ або тверді горючі речовини

Газо-пароповітряні вибухонебезпечні середовища утворюють вибухонебезпечні зони класів 0, 1, 2, а пилоповітряні – вибухонебезпечні зони класів 20, 21, 22.

Вибухонебезпечна зона класу 0 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище присутнє постійно або протягом тривалого часу. Вибухонебезпечні зони класу 0 можуть мати місце переважно в межах корпусів технологічного обладнання і, у меншій мірі, в робочому просторі (вугільна, хімічна, нафтопереробна промисловість).

Вибухонебезпечна зона класу 1 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище може утворитися під час нормальної роботи.

Вибухонебезпечна зона класу 2 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище за нормальних умов експлуатації відсутнє, а якщо воно виникає, то рідко і триває недовго. У цих випадках можливі аварії катастрофічних розмірів (розрив трубопроводів високого тиску або резервуарів значної місткості) не повинні розглядатися під час проектування електроустановок.

Вибухонебезпечна зона класу 20 – простір, у якому під час нормальної експлуатації вибухонебезпечний пил у вигляді хмари присутній постійно або часто в кількості, достатній для утворення небезпечної концентрації суміші з повітрям, і (або) простір, де можуть утворюватися пилові шари непередбаченої або надмірної товщини. Звичайно це має місце всередині обладнання, де пил може формувати вибухонебезпечні суміші часто і на тривалий термін.

Вибухонебезпечна зона класу 21 – простір, у якому під час нормальної експлуатації ймовірна поява пилу у вигляді хмари в кількості, достатній для утворення суміші з повітрям вибухонебезпечної концентрації. Ця зона може включати простір поблизу місця порошкового заповнення або осідання і простір, де під час нормальної експлуатації ймовірна поява пилових шарів, які можуть утворювати небезпечну концентрацію вибухонебезпечної пилоповітряної суміші.

Вибухонебезпечна зона класу 22 – простір, у якому вибухонебезпечний пил у завислому стані може з'являтися не часто й існувати недовго або в якому шари вибухонебезпечного пилу можуть існувати й утворювати вибухонебезпечні суміші в разі аварії. Ця зона може включати простір поблизу обладнання, що утримує пил, який може вивільнитися шляхом витоку і формувати пилові утворення.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Підвищення стійкості роботи об'єктів народного господарства, зокрема підприємств приладобудівної галузі, у воєнний час – одна із основних задач цивільної оборони України. Могутність країни базується на стійкій економіці. В сучасних умовах, коли науково-технічний прогрес у всіх сферах виробництва досяг небачених масштабів і привів до створення зброї масового ураження, при великомасштабній війні основні промислові центри і райони будуть головною ціллю для знищення зі сторони противника. Адже виведення економіки з ладу може призвести до того, що країна не зможе стояти на оборонні своїх кордонів та підтримувати життєдіяльність населення. На сьогоднішній день, через війну

росії проти України, проблема підвищення стійкості роботи підприємств приладобудівної галузі стоїть як ніколи гостро.

Під стійкістю роботи приладобудівного підприємства господарювання будь-якої форми власності розуміють здатність його в умовах воєнного часу випускати продукцію в запланованому обсязі й номенклатурі, а при одержанні слабких і середніх руйнувань, порушенні зв'язків по кооперації і постачанням відновлювати виробництво в мінімальний термін.

Здатність підприємства випускати продукцію залежить від захисту і нормального функціонування чотирьох основних елементів сучасного виробництва, якими є:

- виробничий персонал (робітники та службовці);
- будинки і споруди з технологічним устаткуванням;
- система постачання енергією, водою, паливом, устаткуванням і ремонтною базою;
- система виробничих і кооперативних зв'язків з іншими об'єктами.

Тому стійкість роботи приладобудівного підприємства в цілому в умовах надзвичайних ситуацій воєнного часу визначається наступними факторами:

- надійністю захисту робітників та службовців від усіх вражаючих факторів зброї масового ураження;
- здатністю інженерно-технічного комплексу (ІТК) підприємства протистояти вражаючим факторам ядерного вибуху;
- надійністю системи постачання підприємства всім необхідним для виробництва продукції (сировиною, паливом, що комплектують виробами, електроенергією, водою, газом тощо);
- захищеності підприємства від вторинних вражаючих факторів (пожеж, вибухів, затоплень, зараження місцевості отруйними і сильнодіючими отруйними речовинами);
- стійкістю і безперервністю керування виробництвом і цивільним захистом;

– підготовленість підприємства до проведення рятувальних та інших невідкладних робіт і робіт з відновленням порушеного виробництва.

Перераховані фактори визначають собою й основні, загальні для всіх об'єктів приладобудівної галузі, шляхи підвищення стійкості роботи в надзвичайних ситуаціях, а саме:

- забезпечення надійного захисту робітників та службовців від вражаючих факторів зброї масового ураження;
- захист основних виробничих фондів від вражаючих факторів, у тому числі й від вторинних;
- підвищення надійності й оперативності керування виробництвом;
- забезпечення стійкості постачання всім необхідним для випуску запланованої на час надзвичайних ситуацій продукції;
- підготовка до відновлення порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців. В умовах НС мирного і воєнного часу – це найголовніша задача по підвищенню стійкості роботи об'єкта приладобудівної галузі. Робітники й службовці – головна продуктивна сила і тому стійкість економіки визначається, насамперед, здатністю захистити і зберегти цю силу.

Захист робітників та службовців від зброї масового ураження в сучасних умовах здійснюється трьома основними способами:

- укриття людей у захисних спорудженнях (сховищах, протирадіаційних укриттях);
- проведення евакуації робітників, службовців і членів їхніх родин;
- використання засобів індивідуального захисту, а також проведенням заходів щодо протирадіаційного, протихімічного і протибактеріологічного захисту з урахуванням конкретних обставин.

Варто також підкреслити, що найважливішою умовою успішного вирішення задачі захисту людей є навчання їх правилам дії по сигналах

оповіщення цивільного захисту, застосуванню способів і засобів захисту, наданню самопомоги і взаємодопомоги, діям у складі формувань ЦЗ.

Захист засобів виробництва. Полягає в підвищенні фізичної опірності будинків, споруджень і конструкцій об'єкта до впливу вражаючих факторів ядерного вибуху, захисту технологічного і верстатного устаткування, засобів зв'язку й інших засобів, що складають матеріальну основу виробничого процесу.

Підвищення надійності й оперативності керування виробництвом і цивільним захистом. Основу діяльності керівника виробництва – начальника ЦЗ, а також його штабу складає якісне та професійне керування підлеглими йому структурами в організації їхньої дії і напрямку зусиль на своєчасне й успішне виконання виробничих завдань. Тому, забезпечення надійності й оперативності керування є важливою ланкою в підвищенні стійкості роботи об'єкта, в умовах швидко мінливої обстановки воєнного часу і надзвичайних ситуацій. Надійність і оперативність керування досягається створенням на об'єкті стійкої системи керування, високої підготовки керівного і командноначальницького складу ЦЗ до виконання покладених функціональних обов'язків, своєчасним прийняттям рішень і постановкою задач підлеглим відповідно до обставин, що складаються.

Забезпечення стійкого постачання підприємства. Для виробництва продукції необхідні: електроенергія, вода, паливо, сировина, матеріали й інші матеріально-технічні засоби. Забезпечення підприємств цими ресурсами багато в чому визначає можливість нормального їхнього функціонування в умовах воєнного часу. Це досягається проведенням таких заходів, що сприяють підвищенню не ураженості комунально-енергетичних мереж, транспортних комунікацій і джерел постачання, надійному захисту необхідних запасів палива, сировини, напівфабрикатів, що комплектують, виробів тощо.

Підвищення, стійкості роботи об'єкта народного господарства у воєнний час і в умовах надзвичайних ситуацій досягається завчасним проведенням комплексу інженерно-технологічних, технологічних і організаційних заходів, спрямованих на максимальне зниження впливу вражаючих факторів зброї масового ураження і створення умов для швидкої ліквідації наслідків.

Підготовка до відновлення порушеного виробництва здійснюється завчасно і передбачає планування відбудовних робіт по декількох варіантах: підготовку ремонтних бригад, створення необхідного запасу матеріалів і устаткування, надійний його захист.

Підготовка до відновлення порушеного виробництва. Можливості вражаючою дії сучасних видів зброї такі, що забезпечити абсолютний захист від нього об'єктів і споруд практично неможливо. Вони можуть одержати той чи інший ступінь руйнування. У цих умовах задача зводиться до того, щоб у випадку слабких і середніх руйнувань на об'єкті відбудувати об'єкт і відновити випуск необхідної продукції в мінімальний термін.

Підвищення стійкості роботи об'єкта господарської діяльності (ОГД) у НС досягається передчасним дослідженням його стійкості та проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, що забезпечують максимальне зниження впливу вражаючих факторів НС, в тому числі зброї масового ураження, та створення умов для швидкої ліквідації їх наслідків.

Інженерно-технічні заходи, як правило, включають комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруджень, верстатного і технологічного устаткування, комунально-енергетичних систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкта шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє прискоренню виробництва продукції і виключає можливість утворення вторинних вражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного, командно-начальницького складу, штабу, служб і формувань ЦЗ при захисті робітників та службовців підприємства й інших невідкладних робіт, відновленні виробництва, а також по випуску продукції на збережених потужностях.

Вказані шляхи підвищення стійкості роботи об'єктів і галузей виробництва реалізують на практиці за допомогою затверджених норм, які є обов'язковими до виконання всіма об'єктами незалежно від форм власності й підпорядкування.

Дослідження стійкості роботи об'єкта приладобудівної галузі складається з всебічного вивчення умов, які можуть виникнути у НС, з визначенням їх впливу на виробничу діяльність та життєзабезпеченість робітників та службовців. Проводиться дослідження стійкості силами інженерно-технічного персоналу із залученням фахівців науково-дослідних і проектних організацій, пов'язаних із даним підприємством.

4.3. Висновки до розділу 4

У підрозділі з охорони праці проаналізовано питання класів виробничих та складських приміщень по вибуховій та пожежній небезпеці.

У підрозділі з безпеки в надзвичайних ситуаціях проаналізовано питання, підвищення стійкості роботи об'єктів приладобудівної галузі у воєнний час та на основі цього визначено фактори, які підвищують ефективність функціонування підприємств приладобудівної галузі у надзвичайних ситуаціях воєнного часу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи здійснено аналіз супутникових каналів зв'язку з сучасними військовими безпілотними апаратами, які стоять на озброєнні у провідних країнах світу. На основі проведеного аналізу визначено типові параметри супутникових каналів управління, навігації та передачі даних телеметрії БПЛА.

Запропоновано структуру методу з використанням трьох синхронізованих систем: система 1 – моніторинг супутникових каналів зв'язку, 2 – постановка радіоелектронних завад, система 3 – радіолокація, ідентифікація, а також визначення супутників з якими працює безпілотний апарат. Для підвищення ефективності радіоелектронного подавлення супутникових каналів зв'язку запропоновано використовувати хаотичну імпульсну заваду, що дозволить вести боротьбу з засобами РЕЗ БПЛА у яких частота змінюється за псевдовипадковою послідовністю.

Розроблено засіб оцінки дестабілізуючих факторів, які впливають на роботу комплексу протидії БПЛА, та оцінено втрати розповсюдження сигналу комплексу РЕП у частотному діапазоні 1-50 ГГц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография.: Наукоемкие технологии, 2020, 204 с.
2. Black Hornet Nano. Технические характеристики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://avia.pro/blog/black-hornet-nano-tehnicheskie-harakteristiki-foto?ysclid=189ssenoz0931263444> // (дата звернення 25.09.2022). Назва з екрану.
3. PD-100 Black Hornet UAV. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.army-technology.com/projects/pd100-black-hornet-nano/> // (дата звернення 25.09.2022). Назва з екрану.
4. Skylark 1 LE Mini UAV. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://defense-update.com/20041128_skylark1-uav-2.html // (дата звернення 25.09.2022). Назва з екрану.
5. Scan Eagle. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104532/scan-eagle/> // (дата звернення 25.09.2022). Назва з екрану.
6. ScanEagle – Mini-UAV (Unmanned Aerial Vehicle). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.naval-technology.com/projects/scaneagle-uav/> // (дата звернення 29.09.2022). Назва з екрану.
7. БЛА Hermes 450. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bp-la.com/bla-hermes-450/?ysclid=18a1ishcgo551223334> // (дата звернення 29.09.2022). Назва з екрану.
8. БПЛА Hermes 450. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bp-la.com/bla-hermes-450/?ysclid=18a1ishcgo551223334> // (дата звернення 01.10.2022). Назва з екрану.
9. Беспилотный летательный аппарат Elbit Hermes 450 (Израиль). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://enovosty.com/armiya/full/113->

- [bespilotnyj-letatelnyj-apparat-elbit-hermes-450-izrail](https://www.army-technology.com/projects/bayraktar-tb2-tactical-uav/) // (дата звернення 02.10.2022). Назва з екрану.
10. Bayraktar TB2 Tactical UAV. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.army-technology.com/projects/bayraktar-tb2-tactical-uav/> // (дата звернення 10.10.2022). Назва з екрану.
11. Bayraktar TB2 Armed Unmanned Aerial Vehicle. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.turkishdefencenews.com/bayraktar-tb2-armed-unmanned-aerial-vehicle/> // (дата звернення 12.10.2022). Назва з екрану.
12. Baykar catalog english. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://crd.yerphi.am/files/Baykar_catalog_eng.pdf // (дата звернення 15.10.2022). Назва з екрану.
13. RQ-4 Global Hawk. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104516/rq-4-global-hawk/> // (дата звернення 15.10.2022). Назва з екрану.
14. MQ-9 Reaper. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://avia.pro/blog/mq-9-reaper?ysclid=l8a295h86y119525233> // (дата звернення 18.10.2022). Назва з екрану.
15. Introduction to Modern EW Systems. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9100312/metrics#metrics> // (дата звернення 18.10.2022). Назва з екрану.
16. Electronic warfare fuels drone capabilities. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.army-technology.com/analysis/uas-electronic-warfare-turkey-russia-syria-dstl/> // (дата звернення 18.10.2022). Назва з екрану.
17. Обзор украинских средств РЭБ против БЛА. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://sivator.com/41786-obzor-ukrainskih-sredstv-reb-protiv-bla.html> // (дата звернення 20.10.2022). Назва з екрану.

18. Will Customs and Border Protection Drones be Furloughed? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dronecenter.bard.edu/customs-border-drones-shutdown/> // (дата звернення 20.10.2022). Назва з екрану.

19. Global Hawk UAS (Unmanned Aerial System) of NASA. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.eoportal.org/other-space-activities/global-hawk#uavsar-unmanned-aerial-vehicle-synthetic-aperture-radar> // (дата звернення 20.10.2022). Назва з екрану.

20. Global Hawk communications. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://barnardmicrosystems.com/media/presentations/IET_UAV_C2_Barnard_DEC_2007.pdf // (дата звернення 25.10.2022). Назва з екрану.

21. UNMANNED AERIAL VEHICLE COMMAND AND CONTROL. <https://doi.org/10.17226/11379>.. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nap.nationalacademies.org/read/11379/chapter/9> // (дата звернення 25.10.2022). Назва з екрану.

22. Ukraine conflict: Ukraine's electronic warfare systems in focus. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/ukraine-conflict-ukraines-electronic-warfare-systems-in-focus> // (дата звернення 25.10.2022). Назва з екрану.

23. Anti UAV system. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.luowave.com/en/ProductDetail/4562788.html> // (дата звернення 25.10.2022). Назва з екрану.

24. Potential Data Link Candidates for Civilian Unmanned Aircraft Systems: A Survey. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8935306> // (дата звернення 30.10.2022). Назва з екрану.

25. Химич Г.П., Умзар Ю. Методи вдосконалення надширокопосмугових супутникових систем зв'язку та моніторингу системного базування. 2011.

26. ORCUS Counter-Unmanned Aerial System. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.airforce-technology.com/projects/orcus-counter-unmanned-aerial-system-united-kingdom/> // (дата звернення 30.10.2022). Назва з екрану.

27. ELI-4030 Drone Guard Drone Detection, Identification, Classification & Disruption. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iai.co.il/p/eli-4030-drone-guard> // (дата звернення 01.11.2022). Назва з екрану.

28. БУКОВЕЛЬ-AD. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spetstechnoexport.com/uk/product/bukovel-ad> // (дата звернення 01.11.2022). Назва з екрану.

29. 'ANKLAV' complex. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ust.com.ua/en/item/anklav-2/> // (дата звернення 05.11.2022). Назва з екрану.

30. A Survey of Cyberattack Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/355864007_A_Survey_of_Cyberattack_Countermeasures_for_Unmanned_Aerial_Vehicles // (дата звернення 05.11.2022). Назва з екрану.

31. P.K. Garg. Unmanned Aerial Vehicles An Introduction. / Mercury Learning and Information LLC.: 2021, 430 p.

32. Jay Gundlach. Designing Unmanned Aircraft Systems: A Comprehensive Approach. / American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.: 2012, 869 p.

33. Douglas M. Marshall, R. Kurt Barnhart, Eric Shappee, Michael Most. Introduction to Unmanned Aircraft Systems Second Edition. / CRC PressTaylor & Francis Group.: 2016, 380 p.

34. David L. Adamy. EW105 Space Electronic Warfare. / Artech House 685 Canton Street.: 2021, 247 p.

35. Mohammad Sadraey. Unmanned Aircraft Design A Review of Fundamentals. / Morgan & Claypool.: 2017, 211 p.

36. R. E. SMILEY. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook. / Morgan & Claypool.: 2013, 455 p.

37. Методичні рекомендації “боротьба з безпілотними літальними апаратами” (за досвідом проведення ООС (раніше АТО). [Електронний ресурс] // Стаття. Режим доступу: <https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2022/04/ВП-7-0003.01-Боротьба-з-БПЛА.pdf> // (дата звернення 10.11.2022). Назва з екрану.

38. Giovanni E. Corazza. Digital satellite communications. / Springer Science+Business Media, LLC.: 2007, 578 p.

39. Overview of modulation schemes selection in satellite based communication. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ictactjournals.in/paper/IJCT_Vol_11_Iss_3_Paper_1_2203_2207.pdf // (дата звернення 10.11.2022). Назва з екрану.

40. Криванич Є.М., Химич Г.П. Метод первинного захисту інформаційних каналів супутникового зв'язку // Збірник тез VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ», том I. – Тернопіль, ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 27-28 листопада 2019 р. – С. 99.

41. Химич Г.П. Методи боротьби з безпілотними літаючими апаратами // Збірник тез // Тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє» / за заг. редакцією І.В. Толока. – К.: ВІКНУ, 2018. – 404 с.

42. Химич Г.П., Дунець В.Л. Супутникові системи телекомунікацій на основі технологій 4G-5G. Матеріали міжнародної наукової конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (до 175-ліття від дня народження), 2020, 106-107.

43. RF signal attenuation due to atmospheric gases. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/gaspl.html> // (дата звернення 12.11.2022). Назва з екрану.

44. Free space path loss. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/fspl.html> // (дата звернення 13.11.2022). Назва з екрану.

45. Modeling the Propagation of Radar Signals. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/radar/ug/modeling-the-propagation-of-rf-signals.html> // (дата звернення 13.11.2022). Назва з екрану.

46. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Методы и средства радиоэлектронной борьбы. Монография. – 2021, 376 с.

47. Adamy D.L. Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation. Raleigh: SciTech, 2006, 240 p.

48. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2020-02/05-Makarenko.pdf> 150 Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146.

49. Класифікація приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/1200.html> // (дата звернення 30.11.2022). Назва з екрану.

50. Підвищення стійкості роботи об'єктів господарської діяльності (ОГД) за надзвичайних умов мирного й воєнного часу (Конспект лекцій для студентів очної і заочної форми навчання всіх напрямків) / Укл. Обухов С.О. - Харків: ХНАМГ, 2008 р, 27 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Копія тези

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)
Університет імені П'єра і Марії Кюрі (Франція)
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Міжнародний університет цивільної авіації (Марокко)
Наукове товариство ім. Т.Шевченка

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник
тез доповідей

**XI Міжнародної науково-практичної
конференції молодих учених та студентів**
7-8 грудня 2022 року



УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2022

Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів
«АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 7-8 грудня 2022 року

УДК 621.396.946

І. Гунчак, Г. Химич

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З СУПУТНИКОВИМИ СИСТЕМАМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ДРОНІВ

Ivan Hunchak, Hryhoriy Khymych

RESEARCH ON THE METHOD OF RADIO-ELECTRONIC COMBAT WITH SATELLITE TELECOMMUNICATION SYSTEMS OF DRONES

«Якщо розпочнеться третя світова чи інша війна, то переможцем буде той, хто зможе краще діяти та поводитися з електромагнітним спектром». Адмірал Т. Морер. 1972 р., колишній голова об'єднаного комітету начальників штабів США.

Дане твердження знайшло свою правоту та відображення у військових конфліктах та війнах, особливо XXI століття, а саме: збройний конфлікт у Республіці Македонія, 2001 рік, конфлікт у Південній Сербії (2000—2001) роки, війна в Іраку, 2003 рік під назвою «Свобода Іраку», війна в Афганістані, (2001 – 2021) роки, російсько – грузинська війна, 2008 рік, війна в Сирії, (2015-2019) роки, збройні конфлікти між Ізраїлем та Палестиною, (2014 – 2022) роки, російсько - українська війна, (2014 – 2022) роки.

Пріоритетними стали надвисокочастотні та цифрові технології, роботроніка, штучний інтелект. Це дає можливість створювати безпілотні системи наземного, водного та повітряного базування, які є задіяними у різних аспектах бойових, розвідувальних діях, системах радіоелектронної боротьби та протидії, системах зв'язку, передачі даних, радіолокації, тощо.

Один із надактуальних напрямів ведення військових дій – використання дронів, які виконують радіомоніторинг, радіо- та оптичну розвідки, радіоподавлення систем зв'язку і передачі даних, проведення кібератак на інфраструктуру, знищення техніки та живої сили, дистанційне зондування великих територій противника з висоти понад (10 – 20)км.

Враховуючи статистичні дані з попередніх війн, військових конфліктів та війну з росією в Україні, можна констатувати, що боротьба з дронами (їхня нейтралізація) є теж надважливим аспектом. Розвиток і удосконалення технологій створення дронів та систем радіоелектронної боротьби і подавлення безпілотних систем відбувається паралельними шляхами.

У даній статті розглядається один із методів виявлення та подавлення каналів керування та навігації супутникових систем управління дронами.

Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) представлена основними складовими, табл.1.

	GPS	GLONASS	Galileo	Beidou
Розробник	США	Росія	ЄС	Китай
Висота	20180 км	19130 км	23222 км	21150
Кількість супутників	24	24	24+6 зап.	28
Частотні діапазони, ГГц	1.563-1.587	1.593-1.610	1.559-1.592	1.561-1.589
	1.215-1.239	1.237-1.254	1.164-1.215	1.207-1.268
	1.164-1.189	1.189-1.214	1.260-1.300	
Точність локалізації	0.3-5 м	2-4 м	0.01-1 м	0.1-3.6 м

Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів
«АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 7-8 грудня 2022 року

Один із варіантів надання послуг з керування дронами через супутникову телекомунікаційну систему SATCOM для каналів передачі даних BLOS для БПЛА (безпілотний літаючий апарат, дрон), приведено в табл.2.

SATCOM дозволяє видавати команди, управляти та мати зв'язок з БПЛА. BLOS, забезпечує максимальну можливу дальність покриття. Випадок BLOS для розширення зони керування для БПЛА показаний на рис. 1. SATCOM є надзвичайно мобільним, з високою надійністю і стійкістю до завад, високою швидкістю передачі даних. Ці функції є корисними для БПЛА з відеозв'язком або датчиками зображення для критично важливих завдань. Супутники на низькій навколосемній орбіті (LEO), що працюють на висоті 2000 км, і супутники на геостационарній навколосемній орбіті (GEO), що працюють на висоті 35 000 км, є двома популярними технологіями SATCOM, які використовуються для БПЛА

Компанії, що надають послуги BLOS SATCOM для БПЛА, таблиця 2.

Компанія	InmarSAT	InmarSAT	Iridium	Globalstar	SpaceX
Продукт	BGAN	GX	Iridium NEXT	Globalstar	SpaceX
Орбіта	GEO	GEO	LEO	LEO	LEO
К-сть супутників	3	3	66	24	4000
Діапазон	L	Ka	L	S i L	Ku
Затримка даних	800 мс	600 мс	40 мс	40 мс	150 мс
Пропускна здатність на супутник	800 Мбіт/с	12 Гбіт/с	невідомо	невідомо	50 Гбіт/с
Загальна пропускна здатність	2.4 Гбіт/с	36 Гбіт/с	невідомо	невідомо	200 Тбіт/с
Швидкість передачі даних на користувача	492 кбіт/с	5 Мбіт/с	128 кбіт/с	7.2 кбіт/с	Невідомо
Дата початку роботи	2012	2015	2017	2013	2020

Огляд за горизонтом розширює функціональність БПЛА в програмному режимі.

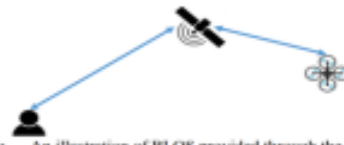


Fig. . An illustration of BLOS provided through the Satellite

Метод виявлення, аналізу та подавлення супутникових каналів керування та навігації БПЛА є досить складним та потребує за діяння додаткових систем, які повинні працювати синхронно з системою подавлення. Метод повинен: виявляти канали зв'язку БПЛА з його наземною станцією для управління, канали навігації, лінії зв'язку UAS з іншим повітряним судном або супутником, що впливає на його польотні характеристики, сигнали зв'язку UAS (з будь-яким джерелом), які впливають на SAA / навігацію / корисне навантаження / шляхові точки.

Структурно даний метод можна реалізувати згідно, рис.2.

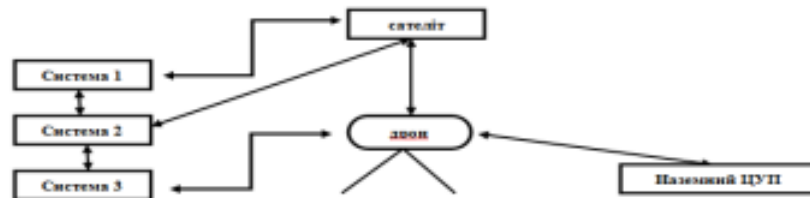


Рисунок 2. Структура комплексу боротьби з БПЛА, які керуються через супутникові канали зв'язку та навігації.

Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів
 «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 7-8 грудня 2022 року

23.	А.М. Паламар, Ю.А. Гук КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ	147
24.	Д.Р. Колісник, Д.В. Мидлик, І.Ю. Дедів, Л.С. Дедів ЗАДАЧА ОЦІНЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ У ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ	148
25.	С.Р. Пискальний, Б.В. Сарняк, І.Ю. Дедів ЗАДАЧА УЩІЛЬНЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ	149
26.	М.П. Мотелюк, С.Т. Боїло, І.Ю. Дедів, В.Г. Дозорський МЕТОДИ ОБРОБКИ МОВНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ БЕЗПЕКОВИХ СИСТЕМ	150
27.	Б.Є Томс, Г.П. Химич ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛІНІЙ У МІСЬКИХ УМОВАХ	151
28.	А.О. Naida, L.V. Moroz DATAFICATION: THE PROBLEM BENEATH THE SURFACE	153
29.	О.В. Палка МІКРОСЕРВІСНА АРХІТЕКТУРА РОЗУМНОГО МІСТА	155
30.	О.В. Палка ІНТЕГРОВАНА АРХІТЕКТУРА РОЗУМНОГО МІСТА З БЛОКЧЕЙНОМ ТА ІОТ	157
31.	І. Гуничак, Г. Химич ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З СУПУТНИКОВИМИ СИСТЕМАМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ДРОНІВ	158
32.	А.В. Атаманчук, І.Ю. Дедів МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ БПЛА З ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ	160
33.	В.Л. Дунець, Н.І. Шилівський, О.Ю. Щирба, Д.О. Гуменюк, Т.В. Чирський АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ	162
34.	В.В. Никитюк, к.т.н., О.Ф. Дозорська, к.т.н., А.К. Карнаухов МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОВНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТЕНТИФІКОВАНОГО ВХОДУ КОРИСТУВАЧІВ	163
35.	С.В. Уніят, М.О. Хвостівський АКТУАЛЬНІСТЬ ОБРОБКИ ПУЛЬСОВИХ СИГНАЛІВ ПРИ ФІЗИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ У КАРДІОДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМАХ	164
36.	Ю.Б. Капаціла, С.Р. Дідур ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ТРАЕКТОРІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ	165
37.	Н.А. Гарматюк, П.О. Скалецький, В.О. Дуда ХМАРНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПЛАТФОРМИ ТА MICROSOFT AZURE	167
38.	Н.В. Лісовий, А.Р. Ставицька, А.В. Гіжовський ХМАРНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЛАТФОРМИ АНАЛІТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ	168
39.	П.О. Скалецький, Н.А. Гарматюк, В.О. Дуда ПЕРЕНОСЕННЯ ДАНИХ УСТАНОВ ТА ОРГАНІЗАЦІЙ З ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ ДО ХМАРНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПЛАТФОРМ	169
40.	Р. Новчук, Р. Трач, Р. Трембач АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗБОРУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ	171