

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮІК 941310.000 ПЗ

Аналіз стійкості навігаційних систем БПЛА
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЕПШМ-22-1

Шум А.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Електронні пристрої та системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Бондаренко І. М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І. М.

(прізвище, ініціали)

Харків 2024

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 171 Електроніка _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ «Електронні пристрої та системи» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« 20 » _____ 11 _____ 20 23 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Шуму Андрію Валерійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Аналіз стійкості навігаційних систем БПЛА _____

Затверджена наказом по університету від _____ 20.11. 2023р. № 1369 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 08.01. 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____ Провести системний, апаратний та технічний аналіз принципів дії навігаційних систем і засобів БПЛА. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1) Огляд існуючих типів БПЛА та їх електронного забезпечення в залежності від типів та завдань, які за їх допомогою вирішуються. Визначення особливостей БПЛА військового призначення. _____

2) Огляд та опис принципів дії існуючих навігаційних систем БПЛА та засобів їх технічної реалізації. _____

3) Огляд існуючих методів і засобів РЕБ проти БПЛА з визначенням на які електронні складові й як вони впливають. _____

4) Визначити та обґрунтувати можливі варіанти впливу на навігаційні системи БПЛА. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

1. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про різновид БПЛА та їх особливості використання.	05.11.2023	Виконано
2	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про навігаційну систему БПЛА .	20.11.2023	Виконано
3	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про особливості засобів протидії БПЛА.	24.12.2023	Виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	28.12.2023	Виконано
5	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	06.01.2024	Виконано
6	Проходження нормоконтролю та отримання рецензії	17.01.2024	Виконано
7	Підготовка та захист атестаційної роботи	18.01.2024	

Дата видачі завдання 20 жовтня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Бондаренко І.М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи бакалавра містить 71 сторінок, 17 рисунків, 7 таблиць, 1 формул, 41 джерело, 2 додатки.

БЕСПЛОТНИЙ ЛІТАТЕЛЬНИЙ АПАРАТ, БОРТОВА НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА, РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОДЬБА, ПРОТИДІЯ, СТІЙКІСТЬ

Мета роботи – визначення факторів впливу на навігаційні системи БПЛА, та узагальнення основних сучасних способів побудови систем управління маршрутом польоту БПЛА в автономному режимі.

Об'єкт дослідження – системи керування рухом БПЛА.

Предмет дослідження – навігаційні системи БПЛА.

Метод дослідження – аналітичний.

В роботі розглянуто конструктивну будову та різновиди безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також переваги та недоліки різних типів навігаційних систем БПЛА до фактору впливу радіоелектронних засобів РЕБ. Розглянуто типи радіоелектронних систем РЕБ, їх класифікацію та способи застосування для протидії БПЛА.

ABSTRACT

The explanatory note of the bachelor's qualification work contains 71 pages, 17 figures, 7 table, 1 formulas, 41 sources, 2 appendices.

UNMANNED AIRCRAFT, ONBOARD NAVIGATION SYSTEM,
RADIO ELECTRONIC WARFARE, COUNTERMEASURE, RESISTANCE

The purpose of the work is to determine the factors affecting UAV navigation systems, and generalize the main modern ways of building UAV flight route control systems in autonomous mode.

The object of research is UAV traffic control systems.

The subject of research is UAV navigation systems.

The research method is analytical.

The work considered the structural structure and differences of unmanned aerial vehicles (UAVs). Advantages and disadvantages of various types of UAV navigation systems to the factor of influence of electronic means of EW. The types of radio-electronic systems themselves, their classification and methods of application for countering UAVs are considered.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ БПЛА ТА ЇХ ЕЛЕКТРОННОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТИПІВ ТА ЗАВДАНЬ, ЯКІ ЗА ЇХ ДОПОМОГОЮ ВИРІШУЮТЬСЯ. ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ БПЛА ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	11
1.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ БПЛА	11
1.2 КОНСТРУКЦІЯ БПЛА.....	12
1.3 КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА ЗА ЛЬОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ....	13
1.4 ОСОБЛИВОСТІ БПЛА ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	16
2. ОГЛЯД ТА ОПИС ПРИНЦИПІВ ДІЇ ІСНУЮЧИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ БПЛА ТА ЗАСОБІВ ЇХ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ.....	18
2.1 НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА	18
2.2 ВИДИ НАВІГАЦІЇ ТА ЇХНІ ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ	19
2.2.1 ІНЕРЦІАЛЬНА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ.....	19
2.2.2 СУПУТНИКОВА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ	28
2.2.3 ДАЛЕКОМІРНА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ	31
2.2.4 КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ	33
2.2.5 ОПИСОВА МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА.....	34
3 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РЕБ ПРОТИ БПЛА З ВИЗНАЧЕННЯМ НА ЯКІ ЕЛЕКТРОННІ СКЛАДОВІ Ї ЯК ВОНИ ВПЛИВАЮТЬ.....	40
3.1 ОСОБЛИВОСТІ ПРОТИДІЇ БПЛА ЗАСОБАМИ РЕБ	40
3.2 ТАКТИЧНО-ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВИХ ЗАСОБІВ РЕБ.....	44

	7
3.2.1 БОЙОВІ КОМПЛЕКСИ РЕБ	45
3.2.2 КОМЕРЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ РЕБ.....	50
3.2.3 МАЛОГАБАРИТНІ ПЕРЕНОСНІ ЗАСОБИ РЕБ	54
4 ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ ВПЛИВУ НА НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ БПЛА.....	57
4.1 ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА	57
4.2 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ПРИЙОМІ СИГНАЛІВ СРНС	60
4.3 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА , ЗАСНОВАНОЇ НА КОМПЛЕКСУВАННІ ДАНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМ І СИГНАЛІВ СРНС.....	63
4.4 МОЖЛИВОСТІ АКУСТИЧНОГО ПРИДУШЕННЯ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА , ЗАСНОВАНОЇ НА МІКРОМЕХАНІЧНИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ.....	65
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	68
ДОДАТОК А.....	72
ДОДАТОК Б.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БД – база даних;

БІНС – безплатформні інерціальні навігаційні системи;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ДПЛА – дистанційно-пілотований літальний апарат;

ДРВ – джерело радіовипромінювання;

ДУС – датчики кутових швидкостей;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

ЗРК – зенітний ракетний комплекс;

КВГ – коріолісові вібраційні гіроскопи;

КРУ – командна радіолінія управління ;

ЛА – літальний апарат;

МЕМС – мікроелектромеханічна система;

ММА – мікромеханічні акселерометри;

НРМ – наземний радіомаяк;

НС – навігаційна система;

ОЕС – оптико-електронний засіб;

ПНС – пірометрична навігаційна система;

ППО – протиповітряна оборона;

ППРЧ – псевдовипадкова перебудова робочої частоти;

ПУ – пункт управління;

РД – радіомаяк;

РЕВ – радіоелектронне виявлення;

РЕЗ – радіоелектронний засіб;

РЛС – радіолокаційна станція;

РРТР – радіо та радіотехнічна розвідка;

СРНС – супутникова радіонавігаційна система;

ССН – супутникова система навігації;

ТТХ - тактико-технічні характеристики;

УКХ – ультра короткі хвилі;

ХТГ – хвильові твердотільні гіроскопи;

ШСС – широкопasmові сигнали;

ВСТУП

У реаліях сьогодення, коли в Україні триває жорстока війна по відбиттю атак ворога-загарбника, який тисне кількісною перевагою у живій силі, у пріоритеті стає зменшення втрат військових ЗСУ, задля збереження дієздатності у відбитті атак. Щоб протистояти ворогу треба знаходити альтернативні засоби які були б дешевими у виготовленні і могли замінити військового на полі бою. Війна показала, що роль БПЛА була недооцінена. Цей вид зброї є дешевший за ціною літака, або керованого авіа-снаряду чи іншого виду озброєння, яке має подібну поставлену задачу на полі бою. Та найголовніше, це те, що пілоту не потрібно перебувати на борту при керуванні ЛА.

Однією з проблем, яка виникла при використанні безпілота на полі бою, була вразливість ЛА до радіоелектронного придушення системи навігації, в наслідок чого БПЛА втрачав керованість та виходив з ладу. Тому на даний момент це одна з ключових проблем, яка не дозволяє виконувати деякі задачі, на сам перед тим БПЛА, які не мають стійкості до радіо електронної перешкоди.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ БПЛА ТА ЇХ ЕЛЕКТРОННОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТИПІВ ТА ЗАВДАНЬ, ЯКІ ЗА ЇХ ДОПОМОГОЮ ВИРІШУЮТЬСЯ. ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ БПЛА ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1 Характеристики БПЛА

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) - літальний апарат, який може бути літакового або гелікоптерного типу, без екіпажу на борту. БПЛА може мати різний ступень автономності - від керованого дистанційно до повністю автоматичного, а також може відрізнятися за конструкцією, призначенням і безліччю інших параметрів.

Управління БПЛА може здійснюватися епізодичною подачею команд або безперервно. В останньому випадку БПЛА називають дистанційно-пілотованим літальним апаратом (ДПЛА) (рис.1.1) [1, 2]:



Рисунок 1.1 – БПЛА різного типу та призначення

У сучасних реаліях БПЛА призначені для розв'язання широкого спектра завдань, та здатні використовуватися в таких галузях як:

- аерофотозйомка площинних і лінійних об'єктів;
- моніторинг надзвичайних природних стихій;
- моніторинг стану гідроелектростанцій;
- контроль стану газо- і нафтопроводів;
- контроль етапів будівництва різних об'єктів;
- забезпечення охорони та безпеки території;
- контроль сільськогосподарських процесів;
- виконання військових завдань (розвідка, ураження цілей противника);
- доставка вантажів у важкодоступні райони;
- виконання рятувальних операцій і багато іншого.

1.2 Конструкція БПЛА

За конструкцією повітряні БПЛА можуть бути наступних видів:

- БПЛА в конструкції корпусу яких є фіксоване крило. Перевагами цих ЛА є велика дальність і швидкість польоту;
- мультикоптери. Такі ЛА можуть мати різну кількість пропелерів: від 2-х до 8-ми;
- БПЛА вертолітного типу;
- конвертоплан. Особливість таких моделей в тому, що вони є гнучкими у використанні, тому що в конструкції поєднують як вертолітні характеристики (можуть виконувати вертикальні пересування та зависання на одному місці). Так і пересуваються подібно літаку, спираючись на крила.
- глайдер або планер. Ці пристрої можуть бути з двигуном або без двигуна. У більшості випадків їх використовують для розвідувальних операцій;
- тейлсіттери. БПЛА для зміни режиму польоту повертає свою конструкцію у вертикальній площині.

БПЛА в більшості випадків складаються з наступних основних елементів, таких як:

- фюзеляж (корпус БПЛА),
- двигун(електродвигун або двигун внутрішнього згорання);
- акумулятор (як для живлення двигуна, так і живлення бортової електроніки);
- системи управління (зокрема бортовий комп'ютер),
- система навігації БПЛА;
- та інші, необхідні для виконання завдань, прилади [2].

1.3 Класифікація БПЛА за льотними характеристиками

Безпілотні літальні апарати розрізняють не тільки за способом їхнього застосування в певних сферах нашого життя, або відмінністю конструкції, а й за більш стійкими параметрами і характеристиками, наприклад, злітною масою, дальністю, висотою і тривалістю польоту, розмірами самих апаратів тощо.

Міжнародною асоціацією з безпілотних літальних систем UVSI, яка є найбільшою у світі організацією, що займається виключно розвитком безпілотних систем, і налічує в собі спільноту експертів, операторів і виробників безпілотних систем близько 6 000 осіб і 2100 організацій з 55 країн світу було запропоновано універсальну класифікацію БПЛА наведену у таблиці 1.1, яка об'єднує багато з названих критеріїв [3].

З таблиці 1.1 можна побачити, що на сьогоднішній день категорія БПЛА є досить розвиненою та різноманітною. До неї входять як дуже малі літальні апарати такі як дрони, рисунок 1.2, з масою від кількох грам, так і дійсно вражаючі екземпляри, рисунок 1.3, які відрізняються від літака лише відсутністю екіпажу на борту. Розміри надважких безпілотних літальних апаратів вимірюються метрами, а їхня вага становить кілька тон (табл.1.1) (рис.1.2, рис.1.3) [3].

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА UVS International

Група	Категорія	маса, кг	Дальність польоту, км	Висота польоту, м	Тривалість польоту, год
Малі БПЛА	Nano БПЛА	< 0,025	< 1	100	< 0,5
	Micro БПЛА	< 5	< 10	250	1
	Mini БПЛА	20 - 150	< 30	150 - 300	< 2
	Легкі БПЛА	25- 150	10 - 30	3000	2 - 4
	Легкі БПЛА з малою дальністю польоту	50 – 250	30 -70	3000	3 - 6
	Середні БПЛА	150 - 500	70 - 200	5000	6 - 10
Тактичні	Середні БПЛА з тривалим часом польоту	500-1500	>500	8000	10 - 18
	Маловисотні БПЛА	250-2500	>250	50-9000	0,5-1
	Маловисотні БПЛА з тривалим часом польоту	15-25	>500	3000	>24
	Середньовисотні БПЛА з тривалим часом польоту	500-1000	>500	5000-8000	24-48
	Висотні БПЛА з тривалим часом польоту	2500-5000	>2000	20000	24-48
	Стратегічні	Бойові(ударні) БПЛА	>1000	1500	12000
БПЛА з бойовою частиною		*	300	4000	3-4
БПЛА ложні цілі		*	300	50-5000	<4
Спец призначення	Стратосферні БПЛА	150-500	0-500	>20000	>48
	Екзостратосферні БПЛА	>2500	*	>30000	*



Рисунок 1.2 – Квадрокоптер DJI Mavic 3 ENTERPRISE

Безпілотники можна класифікувати за безліччю критеріїв, наприклад:

- за розміром і корисним навантаженням;
- за типом конструкції (квадрокоптери, мультикоптери, БПЛА вертолітного типу та БПЛА літакового типу);
- за типом двигуна (електродвигуни, двигуни внутрішнього згоряння і комбіноване рішення);
- за типом управління (дистанційно пілотовані, дистанційно керовані та повністю автоматичні літальні апарати);
- за різними тактико-технічними характеристиками.



Рисунок 1.3 - RQ-4 Стратегічний БПЛА «Global Hawk»

1.4 Особливості БПЛА військового призначення

БПЛА, що використовуються у військових цілях, можуть вирішувати розвідувальні завдання (на сьогодні це основне їхнє призначення), застосовуватися для нанесення ударів по наземних і морських цілях, перехоплення повітряних цілей, здійснювати постановку радіоперешкод, управління вогнем і цілевказівки, ретрансляції повідомлень і даних, доставки вантажів [3].

Основною перевагою БПЛА/ДПЛА є істотно менша вартість їхнього створення та експлуатації (за умови однакової ефективності виконання поставлених завдань): за експертними оцінками, бойові БПЛА верхнього діапазону складності коштують від 5-6 млн дол., у той час як вартість

пілотованого винищувача-бомбардувальника F-35 складає близько 100 мільйонів доларів (плюс суттєві витрати на навчання пілота). Важливим фактором є те, що оператор бойового БПЛА не ризикує своїм життям, на відміну від пілота бойового літака. Недоліком БПЛА є вразливість систем дистанційного керування, що особливо важливо для БПЛА військового призначення [4, 5, 6, 7].

Відповідно до рівня військового управління, на користь якого БПЛА вирішує завдання, слід розрізняти:

- стратегічні БПЛА;
- оперативно-тактичні БПЛА;
- тактичні БПЛА.

Відповідно до принципу польоту БПЛА слід розрізняти:

- БПЛА літакового типу;
- БПЛА вертолітного типу.

Сучасні функціональні методи класифікації, використовувані зарубіжними військовими аналітиками, ґрунтуються на первинній різниці між бойовими безпілотними літальними апаратами і БПЛА забезпечення (рис.1.4) [8].

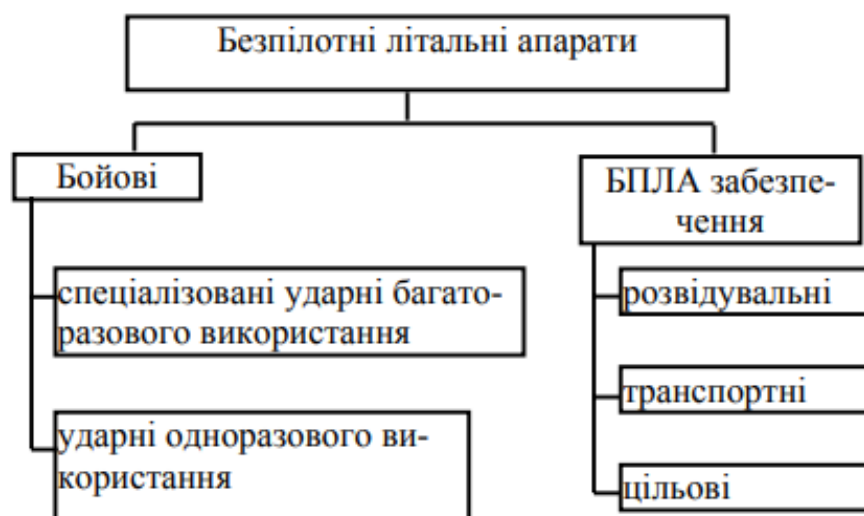


Рисунок 1.4 – Загальна класифікація БПЛА

2 ОГЛЯД ТА ОПИС ПРИНЦИПІВ ДІЇ ІСНУЮЧИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ БПЛА ТА ЗАСОБІВ ЇХ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

2.1 Навігаційна система

Навігація є невід'ємною частиною сучасних БПЛА. Без неї, літальний апарат, не матиме змоги орієнтуватися у просторі. На відміну від літака на боту якого керувати літальним процесом може пілот, у БПЛА це завдання покладається на прилади систем навігації, які можуть вказати потрібну дистанцію, або прокласти курс до поставленої цілі, та надавати БПЛА орієнтацію в просторі відносно Землі.

До видів навігації безпілотних літальних апаратів можна віднести чотири основних типи систем навігації, а саме (рис. 2.1):

- інерційна система навігації (ІНС);
- супутникова система навігації (ССН);
- далекомірна система навігації (ДСН);
- комплексна система навігації (КСН).



Рисунок 2.1 – Види джерел навігації БПЛА

2.2 Види навігації та їхні переваги і недоліки

2.2.1 Інерційна система навігації.

Інерційна навігація – це система навігації (визначення координат і параметрів руху різних об'єктів – кораблів, дронів, ракет, літаків тощо) та керування їхнім рухом, яка ґрунтується на властивостях інерційних тіл, що є автономними, тобто не вимагає наявності зовнішніх орієнтирів або сигналів, що надходять ззовні.

В інерційній системі навігації визначення місця розташування літального апарату (ЛА) здійснюється шляхом інтегрування навігаційних параметрів із показань інерційних датчиків, наприклад, значень кутової швидкості та прискорення [9, 10].

Неавтономні системи розв'язання задач навігації ґрунтуються на використанні зовнішніх орієнтирів або сигналів, наприклад (маяків, радіосигналів тощо). Ці системи в принципі досить прості, але в низці випадків не можуть бути здійснені через відсутність видимості або наявність перешкод для радіосигналів тощо. Необхідність створення автономних навігаційних систем стала причиною виникнення інерційної навігації.

Сутність інерційної навігації полягає у визначенні прискорення об'єкта і його кутових швидкостей за допомогою встановлених на об'єкті, що рухається, приладів і пристроїв, а за цими даними - місцеположення (координат) цього об'єкта, його курсу, швидкості, пройденого шляху тощо, а також у визначенні параметрів, необхідних для стабілізації об'єкта й автоматичного керування його рухом. Це здійснюється за допомогою:

- датчиків лінійного прискорення (акселерометрів);
- гіроскопічних пристроїв, які відтворюють на об'єкті систему відліку (наприклад, за допомогою гіростабілізованої платформи) і дають змогу визначати кути повороту і нахилу об'єкта, використовувані для його стабілізації та управління рухом;
- обчислювальних пристроїв (ЕОМ), які за прискореннями (шляхом їх інтегрування) знаходять швидкість об'єкта, його координати та інші параметри руху.

Інерційні навігаційні системи (ІНС). У зв'язку з розвитком технологій та науки в галузі авіаційних навігаційних систем визначено загальні вимоги до бортового обладнання літальних апаратів. Ці вимоги впливають із суворих вимог безпосередньо до безпеки польотів у цивільній авіації. Саме ІНС є однією з найважливіших систем для авіації. Суть інерційної навігації полягає у визначенні прискорення об'єкта та його кутових швидкостей,

визначенні на основі цих даних місця розташування (координат), курсу, швидкості, пройденого шляху та інших параметрів об'єкта, а також стабілізації та керування рухом об'єкта за допомогою апаратури і пристроїв, встановлених на рухомому об'єкті. Створення навігаційних систем пілотованих і безпілотних літальних апаратів вважається одним із найскладніших завдань, розв'язувати яке мають науковці, інженери та фахівці, що займаються питаннями забезпечення польотів. Існує низка методів визначення координат літального апарата і навігаційних параметрів, таких як швидкість польоту відносно Землі. Ці методи поділяються на автономні та неавтономні. Інерційний метод, що не потребує зв'язку зі сторонньою системою, найкращим чином забезпечує автономність. Цей метод ґрунтується на відомому з механіки зв'язку між координатами, швидкістю і прискоренням рухомого об'єкта.

Інерційна навігаційна система (ІНС) складається з інерційного вимірювального модуля (ІМУ) або інерційного еталонного модуля (ІРУ) та навігаційного визначальника для розрахунку прискорення вільного падіння. ІМУ зазвичай складається з трьох акселерометрів і трьох гіроскопів. Структурну схему інерційної навігаційної системи представлено на рисунку 2.2. Коли акселерометр вимірює прискорення руху літального апарата, на його роботу також впливає гравітаційне поле Землі. Навігаційна система видає фактичне значення шляхом віднімання цього значення, тобто прискорення вільного падіння g , із виміряного значення прискорення. Тут навігаційна система визначає координати, інтегруючи отриманий від гіроскопа сигнал і вимірявши орієнтацію об'єкта та прискорення руху об'єкта в заданий момент часу шляхом його подвійного інтегрування. На основі знайдених координат визначається значення g , яке віднімається від виміряного прискорення. Основна функція ІМУ - обчислити та передати до необхідних систем інформацію про кути крену, тангажу і відхилення від курсу повітряного судна та лінійне прискорення. Ця інформація використовується для навігаційних розрахунків і крен-тангажних дисплеїв (рис. 2.2) [9, 10].



Рисунок 2.2 – Структурна схема інерційної навігаційної системи

Інерційні навігаційні системи поділяються, в основному, на 2 групи:

- платформні системи;
- безплатформні системи.

У платформних системах опорну систему координат отримують шляхом розміщення гіроскопів і акселерометрів на стабілізованій платформі. Сучасні ІНС будують, в основному, без платформи. Тут миттєві вихідні сигнали акселерометрів вводять безпосередньо в комп'ютер, і в опорній системі координат розраховують як миттєвий напрямок, так і коригувальні сигнали, відповідні цьому напрямку.

Конструкція під назвою система карданова підвісу являє собою механічну систему. Вона використовує три акселерометри і три гіроскопи, перпендикулярні один одному й орієнтовані по вільній осі обертання. Гіроскопи й акселерометри розміщені на нерухомій пластині в середині цієї конструкції таким чином, щоб виконувати вимірювання в трьох напрямках. Гіроскопи, які перебувають на нерухомій платформі, використовуються для визначення будь-якого крутного моменту платформи. Щоб гарантувати, що платформа може залишатися в рівновазі на основі отриманої інформації, використовують сервоцикли протизв'язку. Цей тип системи має деякі недоліки:

- точки зв'язування піддаються тертю;
- для забезпечення сумісності системи платформи з навігаційною системою потрібна енергія;
- калібрування системи дуже складне і потребує постійного технічного обслуговування;
- велика витрата енергії, велика маса, габарити і дорожнеча.

Безплатформна ІНС має простішу конструкцію, ніж платформна система ІНС. У безплатформному (Strapdown) інерціальному навігаційному пристрої сенсори MEMS загальної конструкції схеми розміщено на нерухомій рамі так, щоб здійснювати вимірювання в трьох напрямках, що зображено на рисунку 2.3 [10].

Встановлена на рухомий об'єкт, безплатформна ІНС складається з 3 акселерометрів, 3 гіроскопів, електроніки сенсорів і лічильника і не має механічного руху. У конструкції Strapdown відсутня механічна система, що запобігає змішуванню інтенсивності гравітаційного поля з прискоренням, створюваним рухом в акселерометрах.

Можна виокремити основні блоки, необхідні для побудови безплатформної ІНС, які представлені на рисунку 2.4:

- блок акселерометрів;
- блок гіроскопів;
- блок розрахунку;
- алгоритм навігації;
- алгоритм орієнтації.

У результаті розвитку електроніки та мікропроцесорної техніки високошвидкісні вимірювання уможливили перехід на безплатформні ІНС. У безплатформних інерціальних навігаційних системах (БІНС) обчислювальний процес ділиться на два алгоритми: алгоритм навігації та алгоритм орієнтації. Алгоритм навігації визначає положення центру мас рухомого об'єкта щодо системи координат опори Землі. Для розв'язання задачі навігації в замкнутій системі координат використовується інформація

про прискорення об'єкта, виміряне за допомогою акселерометрів. Алгоритм орієнтації визначає кутове положення рухомого об'єкта відносно центру мас. Для визначення кутового положення ЛА можуть використовуватися різні кінематичні параметри: кути Ейлера-Крилова, напрямні косинуси, параметри Родрігі-Гамільтона, кватерніони, параметри Кейлі-Клейна та інші (рис. 2.4) [10, 11].

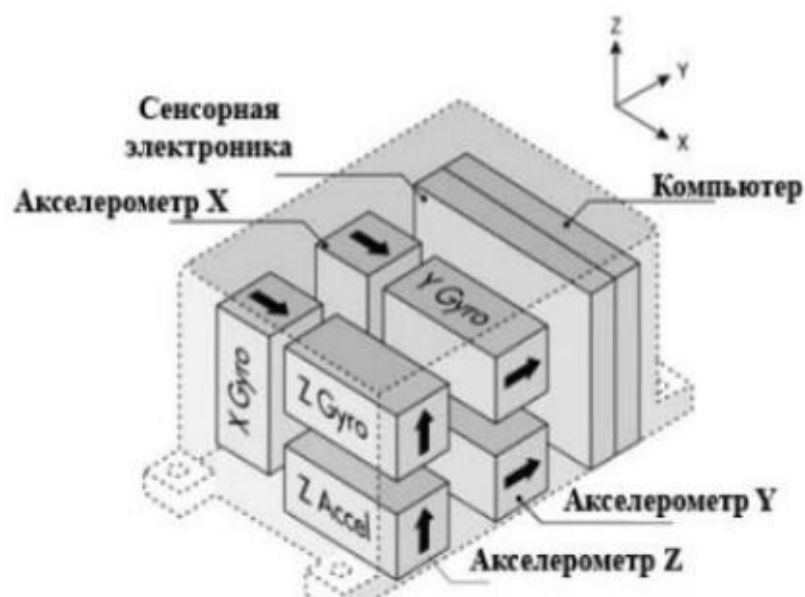


Рисунок 2.3 – Бесплатформеный IMU



Рисунок 2.4 – Узагальнена функціональна схема безплатформної ІНС

Найоптимальніший спосіб розв'язання зазначеного вище завдання - використовувати кінематичні рівняння на основі кватерніонів. Метод кватерніонів - дуже складний і високоефективний метод, розроблений У.Р. Гамільтоном у математичних цілях. Це лінійний тип рівнянь, що не викликають помилок у різних положеннях об'єкта. Крім того, кількість кватерніонних рівнянь дорівнює 4, і їх можна побудувати, застосувавши одне рівняння зв'язку.

Зазначимо, що безплатформна ІНС має низку переваг перед гіростабілізованою платформною ІНС. Останніми роками її широко використовують, передусім через відсутність гіростабілізованої платформи, що являє собою складний електромеханічний пристрій, через невеликі розміри конструкції, низькі енерговитрати і дешевизну виробництва. Крім того, з військового погляду, система ІНС і загальна структура всередині неї можуть використовуватися в багатьох бойових машинах (підводних човнах, танках та ін.) або системах автоматизації. Оскільки для проєктування ІНС не існує стандартів, можна зіткнутися з безліччю помилок:

- помилки обнулення, які виникають під час визначення початкових значень положення та швидкості;
- помилки орієнтації, які виникають через косинус за початковим часом орієнтації карданного підвісу або навігаційних осей напрямку орієнтації в системах strapdown;
- компенсаційні помилки орієнтації;
- компенсаційні помилки, які виникають через косинус за початковим часом орієнтації карданова підвісу або навігаційних осей напрямку орієнтації в системах strapdown;
- визначення параметричних функцій гіроскопа;
- калібрування і компенсація помилок, що виникли.

До основних джерел помилок гіроскопів належать: дрейф нуля, осьове ковзання, чутливість до прискорення тощо. А до основних джерел помилок акселерометрів належать: ухилення, вплив прискорення вільного падіння,

чутливість до кутового прискорення тощо. Як показано на рисунку 4, безплатформна ІНС вимірює кутову швидкість і прискорення корпусу БПЛА щодо інерційних координат. Однак ці вимірювання відчуються в обертовій системі координат корпусу БПЛА, позначеній координатами ІМУ (i_b, j_b, k_b). Крім того, розв'язання бажаної навігації зазвичай виконують відносно другої системи координат, що обертається, з центром у Землі (i_y, j_y, k_y), яка має кутову швидкість згідно з інерційною системою. Якщо потрібен вектор положення БПЛА на поверхні Землі (широта, довгота і висота), то слід використовувати модель для еліпсоїдальної форми поверхні Землі. Одна з найважливіших величин для проблеми керованого БПЛА - це орієнтація системи координат (i_b, j_b, k_b) відносно деяких систем відліку. Звичайним вибором для системи відліку безплатформних обчислень є навігаційна система місцевого рівня, що торкається поверхні Землі та перпендикулярна вектору гравітації, накладеному на БПЛА. Ця система місцевого рівня рухається поверхнею Землі рухом літального апарата. Щоб показати природу навігаційних розрахунків, ми повинні спочатку показати рівняння швидкості, записане в навігаційній системі. Визначається швидкість v БПЛА відносно нерухомої системи координат Землі. Тоді похідна від $\bar{V}(Dn\bar{V})$, спостережувана в навігаційній системі, що обертається, визначається таким виразом (2.1):

$$Dn\bar{V} = \bar{f} + \bar{g} + (2\bar{\omega}_{iy} + \bar{\omega}_{in}) \cdot \bar{V}, \quad (2.1)$$

де \bar{f} - спеціальна сила, вимірювана акселерометрами (прискорення без гравітації);

\bar{g} - вектор гравітації;

$\bar{\omega}_{iy}$ - кутова швидкість Землі відносно інерціальної системи;

$\bar{\omega}_{in}$ - кутова швидкість навігаційної системи відносно нерухомої системи координат.

Це рівняння є векторним рівнянням, яке можна застосувати в будь-якій системі координат. Зазвичай вибирають або описану вище систему навігації місцевого рівня, або систему координат із центром у Землі (рис. 2.5) [12]



Рисунок 2.5 – Інерційна навігація

Ідея створення інерційних навігаційних систем (ІНС) виникла на початку 20-го століття. Базовим чутливим елементом такої системи став акселерометр - прилад для вимірювання прискорення руху об'єкта. Оскільки акселерометр, а також і використовувані в ІНС гіроскопи є інерційними чутливими елементами (засновані на використанні інерції маси), системи називають інерційними.

Метод навігації, який використовується в системі - метод числення шляху. Суть його в тому, що в заданій системі координат вимірюють проекції абсолютного прискорення, інтегруючи їх двічі, отримують швидкість і поточні координати [13].

Оскільки вимірювання має проводитися в заданій системі координат, необхідні гіроскопічні пристрої, що забезпечують моделювання (фізичне або математичне) цієї системи. Тільки до 40-х років минулого століття рівень гіроскопів і акселерометрів піднявся до такого, який дав змогу розпочати реальне розроблення ІНС.

Якщо схема побудови системи для вимірювання координат в інерційному просторі (щодо зірок) порівняно проста, то розв'язання задачі визначення параметрів руху відносно Землі, що обертається, було складнішим. Для розв'язання такого завдання плідним стало використання маятника Шулера. Хоча такий маятник є математичною абстракцією, в ІНС вдалося побудувати його електромеханічний аналог, який забезпечив незворушність системи прискореннями руху відносно Землі та значно знизив зростання помилок.

Із 60-х років минулого століття почалося активне розроблення безплатформних інерційних навігаційних систем (БІНС). Привабливість таких систем у тому, що в них не потрібно гіростабілізована платформа - найскладніший, отже, дорогий вузол ІНС. У БІНС акселерометри і гіроскопи встановлюють безпосередньо на борту об'єкта, а електромеханічну модель гіростабілізованої платформи системи координат замінюють математичною моделлю. Однак ці переваги не вдавалося відразу реалізувати у зв'язку з жорсткими умовами роботи чутливих елементів безпосередньо на борту за високих вимог до їхніх характеристик. При цьому також висувалися високі вимоги до обчислювальних пристроїв. Нарешті, до 80 років було освоєно серійне виробництво БІНС, насамперед у США.

Нині можливості БІНС істотно зростають. Пов'язано це з прогресом у виробництві високоточних гіроскопів і акселерометрів, обчислювальної техніки. З'явилися масові мікрогабаритні БІНС, побудовані на основі мікромеханічних чутливих елементів. При цьому велике значення мають збільшені можливості корекції від супутникових навігаційних систем (СНС), які також набули істотного розвитку в останні десятиліття. В результаті

сфера застосування БНС помітно розширюється – безпілотні літальні апарати, наземні транспортні засоби, роботи, тощо [13].

Отже, основна перевага інерційного навігаційного способу полягає у високій завадостійкості, а недолік - у накопиченні помилок із плином часу. Тому ІСН вимагає періодичної корекції положення ЛА з використанням радіотехнічних способів навігації - супутникового і далекомірного.

2.2.2 Супутникова система навігації.

Супутникова система навігації (ССН) - система, призначена для визначення місця розташування наземних, водних і повітряних об'єктів, а також низькоорбітальних космічних апаратів. Супутникові системи навігації також дають змогу отримати швидкість і напрямок руху приймача сигналу. Крім того, можуть використовуватися для отримання точного часу. Такі системи складаються з космічного обладнання та наземного сегмента (систем управління) (рис.2.6) [14].

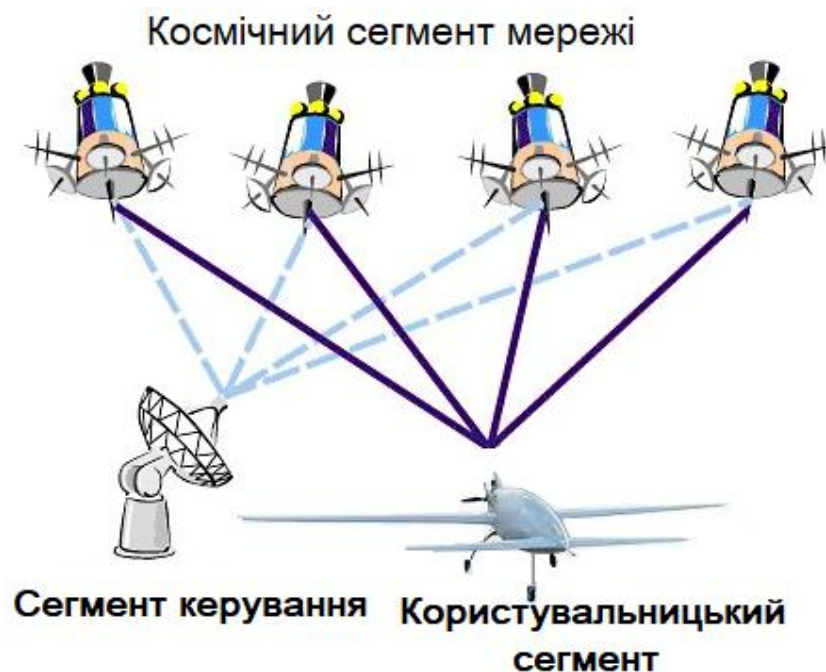


Рисунок 2.6 – Принцип передачі сигналу супутникової навігації

Глобальні навігаційні супутникові системи включають в себе угруповання навколосемних супутників, які передають свої координати в

просторі і часі, мережі наземних станцій управління і приймачів, які обчислюють координати наземних об'єктів шляхом трилатерації. Глобальні навігаційні супутникові системи використовуються у всіх видах транспорту: космічні станції, авіація, морський, залізничний, автомобільний та громадський транспорт.

Позиціонування навігації і синхронізація відіграють важливу роль у телекомунікаціях, землеустрої, правоохоронних органах, реагуванні на надзвичайні ситуації, точному сільському господарстві, гірничодобувній промисловості, фінансах, наукових дослідженнях тощо. Вони використовуються для управління комп'ютерними мережами, повітряним рухом, електромережами тощо [15].

Принцип дії супутникових систем навігації заснований на вимірюванні відстані від антени приймача на об'єкті до навігаційних супутників, місцезнаходження яких відоме з великою точністю. Таблиця положень супутників ("альманах") є в кожному приймачі супутникового сигналу до початку вимірювань. Зазвичай приймач зберігає альманах у пам'яті з часу останнього увімкнення. Кожен супутник передає у своєму сигналі весь альманах. Таким чином, знаючи відстані до кількох супутників систем, за допомогою звичайних геометричних побудов на основі альманаху розраховується положення об'єкта в просторі.

Метод вимірювання відстані від супутника до антени приймача заснований на визначенні швидкості поширення радіохвиль. Для реалізації можливості вимірювання часу поширюваного радіосигналу кожен супутник навігаційної системи випромінює сигнали точного часу, використовуючи синхронізований із системним часом атомний годинник. Під час роботи супутникового приймача його годинник синхронізується із системним часом, і під час подальшого приймання сигналів супутників обчислюється затримка між часом випромінювання, що міститься в самому сигналі, і часом приймання сигналу антеною приймача. Маючи цю інформацію, навігаційний приймач обчислює координати антени. Решта параметрів руху (швидкість,

напрямок, пройдена відстань) обчислюється на основі вимірювання часу, який об'єкт витратив на переміщення між двома або більше точками з координатами, визначеними за попередніми обчисленнями.

Найвідоміші на сьогодні системи супутникової навігації:

- GPS;
- GLONASS;
- GALILEO;
- BEIDOU;
- DORIS.

У супутниковій системі навігації обчислення навігаційних параметрів ЛА здійснюється з використанням сигналів N навігаційних супутників, що формують робоче сузір'я [16, 17].

Перевагою ССН є глобальність і висока точність вимірювання. Недоліком є низька завадостійкість і висока, з погляду безпеки польоту, ймовірність відмови. Крім того, для маневрених ЛА характерна мінливість СРС супутників через великі кути крену і тангажу ЛА. При цьому точність супутникових навігаційних визначень положення ЛА істотно падає.

Супутникові визначення положення також стають неможливими, якщо в зону радіовидимості супутникової антени ЛА потрапляє недостатня кількість НС. Під час відновлення горизонтального польоту ЛА (у разі зменшення кутів крену й тангажу) у супутниковій апаратурі відбувається повторний пошук робочих супутників, стеження за ними, виділення інформації та вимірювання навігаційних параметрів, за якими визначають псевдодальності та псевдошвидкості відносно кожного радіовидимого НС [17].

2.2.3 Далекомірна система навігації.

Далекомірні навігаційні системи працюють у діапазонах коротких коливань і дуже коротких коливань і тому належать до радіотехнічних засобів ближньої навігації. Наземне обладнання цих систем, зване радіомаяками (РМ), встановлюється на повітряних трасах і аеродромах і

призначене для навігаційного забезпечення польотів по повітряних трасах, приведення повітряної системи у район аеродрому і виходу в зону дії посадкових систем (рис. 2.7).

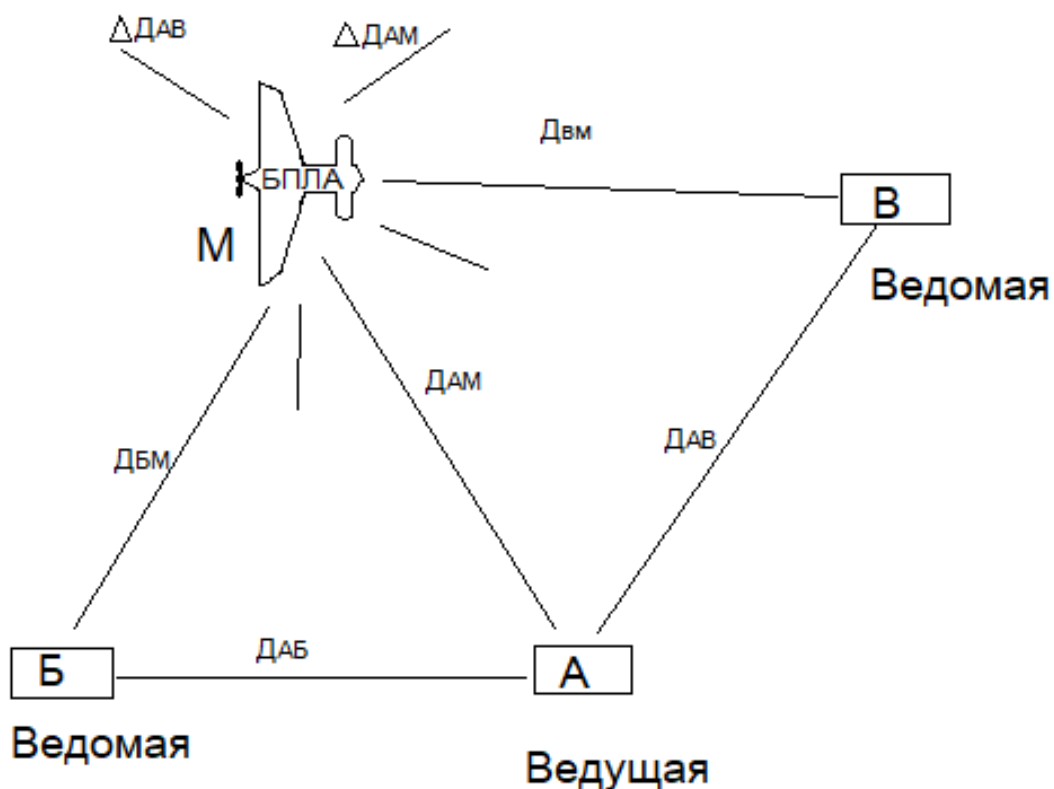


Рисунок 2.7 – Принцип передачі сигналу далекомірної системи навігації

Далекомірні навігаційні системи забезпечують безпосереднє отримання інформації про азимут повітряної системи відносно точки встановлення РМ і про відстань від повітряної системи до цієї точки. Тому такі системи часто називають азимутально-далекомірними. Новітні покоління бортової апаратури кутомірно-далекомірної системи надають можливість вимірювати не тільки азимут і дальність до одного РМ, а й дальності до двох РМ (режим 2D). Вимірювання двох дальностей за певних умов дає змогу досягти більш високої точності визначення місця повітряної системи [18].

Радіонавігаційна система бортового обладнання далекомірної навігації дозволяє вирішувати такі завдання повітряної навігації:

- безперервне автоматичне визначення місця розташування повітряної системи і розпізнавання наземних РМ;

- політ за будь-яким прямолінійним і ламаним маршрутом, що проходить через точку розташування РМ, так і не проходить через неї в режимі ручного, директорного або автоматичного управління повітряної системи;

- корекцію автономних систем повітряної навігації.

У дальномірній навігаційній системі виділяють три функціональні канали:

- канал вимірювання дальності на борту, званий далекомірним;

- канал вимірювання азимута на борту, званий азимутальним;

- канал вимірювання координат повітряної системи на землі, який отримав назву індикаторного.

У далекомірній системі навігації обчислення навігаційних параметрів ЛА здійснюється з використанням сигналів наземних радіомаяків (НРМ), що формують робочу групу. При цьому виконується визначення дальностей ЛА до НРМ шляхом випромінювання запитувальних далекомірних сигналів з борту ЛА, приймання цих сигналів на НРМ, формування та випромінювання відповідних далекомірних сигналів, вимірювання на борту ЛА часу затримки відповідних далекомірних сигналів відносно запитувальних далекомірних сигналів і визначення за допомогою даного вимірювання навігаційних параметрів ЛА [19].

Цей спосіб навігації поступається ССН у точності, але має перевагу в надійності та завадостійкості. Однак далекомірна навігаційна система, так само, як і ССН, залежить від маневрування ЛА, і за великих кутів крену та тангажу ЛА, можливе порушення зв'язку з деякими НРМ через відсутність радіовидимості. Під час організації далекомірного режиму використовується один комплект бортового обладнання в режимі послідовного частотно-

кодового сканування, а вибір НРМ виконується без урахування орієнтації бортової антени. Маневрування ЛА призводить до втрати зв'язку з деякими НРМ, зниження точності та перерв у визначенні положення навігаційної системи [20].

2.2.4 Комплексна система навігації.

Вище розглянуті види навігації, володіють певними перевагами, але й мають деякі недоліки. Тому для успішного рішення завдань навігації в різних умовах і на різних ділянках польоту більш ефективно треба використовувати спільно різні методи навігації, тобто використовувати комплексні навігаційні системи, що поєднують в єдине ціле кілька навігаційних пристроїв з різними принципами роботи.

При створенні комплексних навігаційних систем звичайно прагнуть вирішити наступні завдання:

- забезпечити взаємну корекцію похибок вимірювальних пристроїв, що входять у комплексну систему;
- здійснити фільтрацію і згладжування перешкод та збурень, що виникають у вимірювальних пристроях;
- підвищити надійність, точність та вірогідність вимірів;
- здійснити найбільш повне рішення навігаційних та пілотажних завдань, із метою видачі у систему індикації достовірної інформації про режими польоту.

При побудові комплексних навігаційних систем застосовується спосіб взаємної корекції й фільтрації похибок вимірювальних пристроїв. Цей спосіб реалізується шляхом об'єднання в комплексну систему таких навігаційних систем, які засновані на різних фізичних принципах виміру, але визначають один і той же навігаційний параметр.

Комплексна система містить в собі інерційну, супутникову та далекомірну систему координат. Отже вона може бути більш функціональна та надійна ніж моно системи навігації. При виході із строю навіть двох систем навігації, БПЛА може орієнтуватися на третю.

2.2.5 Описова модель комплексу технічних засобів навігаційної системи БПЛА.

Для розв'язання задач навігації та орієнтації визначальним є вимірювання стану системи. Найповніше ця функція реалізується за допомогою комплексованої навігаційної системи, яка складається з безплатформної інерційної навігаційної системи (БІНС), комплексованої аеромагнітометричної (датчики абсолютного і диференціального тиску, тривісний магнітометр), пірометричної навігаційною системою (ПНС) і супутниковою навігаційною системою ГЛОНАСС/GPS.

Структурну схему глибоко інтегрованої навігаційної системи БПЛА наведено на рисунку 2.8.

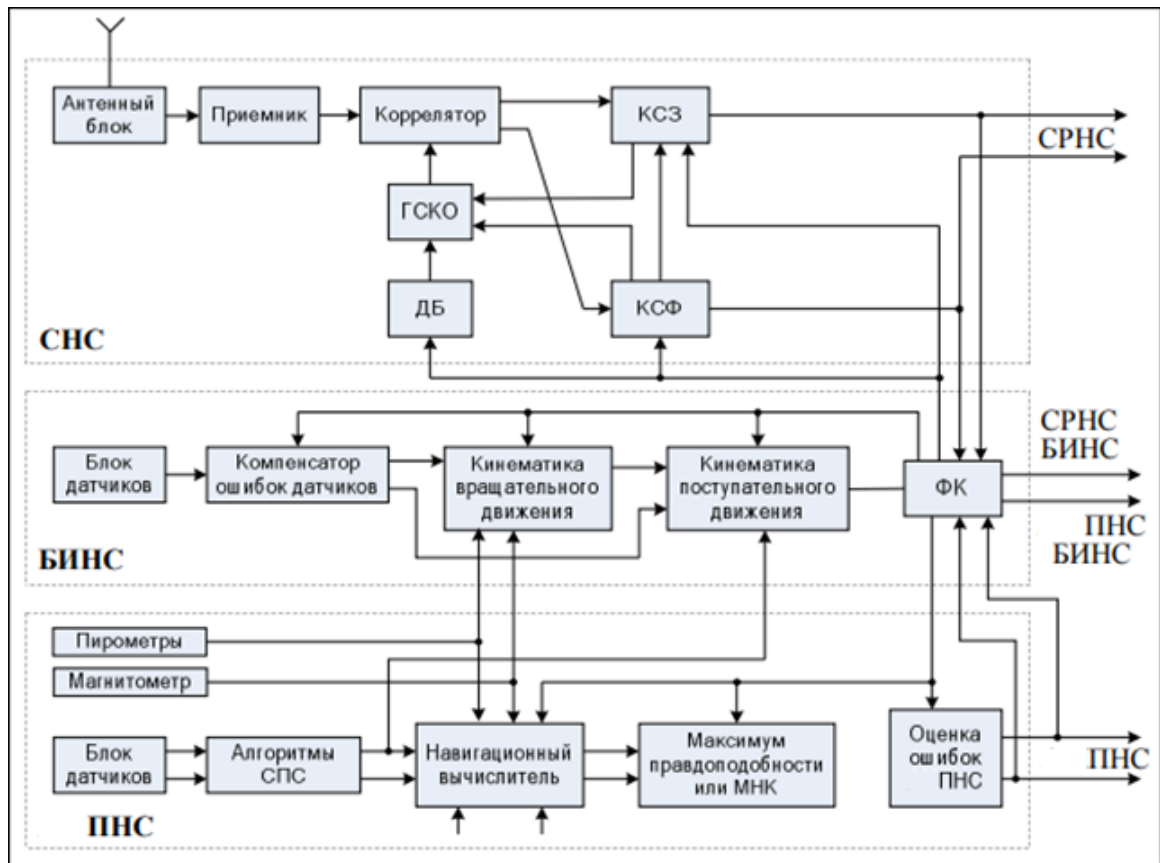
У запропонованій навігаційній системі на основі оцінки отриманої інформації обирається найкраще уловлювання, отримане будь-якою із систем (ССН, БІНС, ПНС), залежно від характеру руху.

Чутливими елементами БІНС є гіроскопи - датчики абсолютних кутових швидкостей обертання. Єдиним джерелом інформації для БІНС є швидкості обертання літального апарата щодо пов'язаної системи координат.

Головним джерелом похибки під час визначення кутів орієнтації є власні відходи (дрейфи) гіроскопів. Для початкової орієнтації (виставки) БІНС щодо опорної системи координат застосовуються акселерометри (рис. 2.7) [21].

Датчиками БІНС є гіроскопічні датчики кутових швидкостей (ДУС) обертання ЛА, за допомогою яких визначається кутове відхилення ЛА щодо опорної системи координат.

Мікромеханічні гіроскопи мають великий дрейф, тому потрібна корекція алгоритму обчислення кутових параметрів. Корекцію алгоритму орієнтації можна здійснювати в моменти часу, коли БПЛА летить прямолінійно і рівномірно.



КСЗ - контур стеження за затримкою; ГСКО - генератор синфазних і квадратурних відгуків; КСФ - контур стеження за фазою; ДБ - додатковий блок; ФК - фільтр Калмана; СРНС - супутникова радіонавігаційна система;

СПС - система повітряних сингалів

Рисунок 2.7 – Структурна схема навігаційної системи БПЛА

Як ДУС для БИНС БПЛА можна застосовувати коріолісові вібраційні гіроскопи (КВГ), хвильові твердотільні гіроскопи (ХТГ) з кільцевим резонатором, а також роторні вібраційні, волоконно-оптичні та твердотільні гіроскопи, якщо вони підходять за масогабаритними параметрами.

Технічні характеристики КВГ наведено в таблиці 2.1.

Мікромеханічні акселерометри за масогабаритними параметрами та енергоспоживанням найбільш підходять для малорозмірних БПЛА (табл. 2.1) [22].

Таблица 2.1 - Характеристики КВГ серии ENV і FNC фірми Murata

Характеристика	Условия	ENV-05D-02	ENC-05S
Стандартные диапазоны, град/с	—	± 80	± 90
Частотный диапазон, Гц	—	—	0 ... 50
Выходной сигнал, В	Нулевая входная угловая скорость	+ (2,2 ... 3 8)	—
Напряжение питания, В	—	+ (4,5 ... 5,5)	+ 5,0 ± 0,1 %
Потребляемый максимальный ток, мА	$U = 5,0 \text{ В}$	15	10
Крутизна характеристики, мВ/град/с	$\frac{(-10 \dots +60)}{(-30 \dots +80)} \text{ } ^\circ\text{Ñ}$	20 ... 24 19 ... 25	0,8 ± 20 %
Дрейф нуля, град/с	$(-30 \dots +80) \text{ } ^\circ\text{Ñ}$	9,0	—
Линейность в % от диапазона	Максимальная угловая скорость; температура $(-20 \dots 25) \text{ } ^\circ\text{Ñ}$	+ 0,5	Менее 5,0
Уровень шума, мВ	Шум 7кГц	20,0	—
Максимальная масса, г; размеры, мм	—	50; 18×30×41	3,5; 20×13×7

Мікромеханічні акселерометри мають чутливий елемент, що включає інерційну масу на пружному підвісі, перетворювач її переміщень і обслуговуючу (сервісну) електроніку, виконані на одному чипі (кристалі) технологіями мікроелектромеханічних систем (MEMS). Розробленням і серійним виробництвом ММА займаються фірми Analog Devices, Motorola, Hitachi, Hilton Head та ін. Найширшим спектром моделей і характеристик володіють ММА серії ADXL фірми Analog Devices. Акселерометри цієї серії є осьовими і випускаються у варіантах прямого та компенсаційного перетворень (табл. 2.2) [22].

Мікромеханічні акселерометри ADXL150 і ADXL 250 належать до приладів третього покоління і мають абсолютну похибку 0,01 г. Порівняно з іншими моделями у них зменшений дрейф нуля, що не перевищує 0 4 г в діапазоні температур (мінус 50...+100)°С. Акселерометри витримують прискорення 2000 г тривалістю 0,5 мс без живлення і прискорення 500 г тривалістю 0,5 мс із живленням.

Таблиця 2.2 – Характеристики ММА серії ADXL

Марка ММА/ количество осей чувствительности	Характеристика, размерность					
	Диапазон измерений, м/с ²	Крутизна статической характеристики, мВ/м/с ²	Нелиней- ность характеристики, %	Плот- ность шума, мВ	Напряжение питания, В / потребляемый ток, мА	Вид сигнала, напряжение или ШИМ
ADXL202/2	±2	12,5 %/g	0,2	0,5	3 ÷ 5 / 0.6	ШИМ
ABKL05/1	±5	—	0,2	0,5		Напряжение
ADXL105/1	±5	250	0,2	0,175	2,7 ÷ 5,2/2	Напряжение
ADXL210/2	±10	—	0,2	0,5		ШИМ
ADXL150/1	±50	38	0,2	1,0	5/2	Напряжение
ADXL250/2	±50	38	0,2	1,0	5/3,5	Напряжение
ADXL190/1	±100	18	0,2		5/2	Напряжение

В аеромагнітометричній і пірометричній системі навігації як чутливі елементи використовують датчики абсолютного і диференціального тиску, трьохосьовий магнітометр, пірометричні датчики.

У загальному випадку датчик тиску, виконаний за технологіями МЕМС, можна використовувати як мікромеханічний датчик тиску (ММДТ).

Найпоширенішими є ММДТ фірми Honeywell і Motorola. У таблиці 2.3 наведено параметри ММДТ фірми Honeywell, які можуть працювати в діапазоні температур мінус 40 ... +85 °С (табл. 2.3) [22].

Для авіоніки БПЛА переважним є магнітометри магніторезистивного типу (датчики).

Трьохосьові магнітометричні датчики дають змогу визначати кутову орієнтацію БПЛА в просторі.

Найбільш широко представлені магніторезистори фірми Honeywell наведеної в таблиці 2.4.

Технічні характеристики пірометрів наведено в табл. 2.5.

Таблица 2.3 – Основні параметри датчиків тиску фірми Honeywell

Наименование	Максимальное рабочее давление, кПа	Максимальное допустимое давление, кПа	Напряжение питания, В	Выходное напряжение, мВ	Чувствительность, мВ/кПа	Компенсация, калибровка	Линейность, % от выходного напряжения
24FCE	3,5	138	10,0	± 35	± 10	Нет	0,25
24PCA/26PCA	6,9			± 45	± 6,5		
24PCB/26PCB	34			± 115	± 3,3		
24PCC/26PCC	103	310		± 225	± 2,2	Нет/да	
24PCD/26PCD	207	410		± 330	± 16		
24PCF/26PCF	690	1380		± 225	± 0,33		
24PCG	1720	3450			± 212	± 0,12	

Таблица 2.4 - Характеристики магніторезисторів фірми Honeywell

Наименование	Диапазон рабочих значений магнитного потока, Гс	Сопротивление моста, Ом	Количество мостов в схеме	Чувствительность, мВ/В/Г	Напряжение питания, В	Максимальная рабочая частота, МГц	Диапазон рабочих температур T, °C
HMC 1001	± 2	850	1	3	5	5	-55...100
HMC 1002			2				
HMC 1021S/Z/D	± 6	1100	1	1	3	5	
HMC 1022			2				
HMC 1052			1000				1
HMC 1051Z	5						
HMC 1023	± 2	1100	3	1000	10	0,001	-40...125
HMC 2003			5				
HMC 1501	0 ... 80	5000	1	2,1	5	± 45	-40...125
HMC 1512		2100	2			± 90	

Таблица 2.5 – Технічні характеристики пірометрів

Модель	Выходной сигнал	Диапазон, мкм	Угол обзора, град	Масса, г	Напряжение питания, В	Производитель
MLX90614	Цифровой	5,5 ... 15	± 88	4	2,6 ... 7	Melexis
MLX90615	Цифровой	5,5 ... 15	± 88	2	2,6 ... 7	Melexis
MLX90247	Аналоговый	5,5 ... 15	± 88	4	2,6 ... 7	Melexis
TPS333	Аналоговый	5,5 ... 12	± 80	2	1,2 ... 12	PerkinEimer
TP297A	Аналоговый	7 ... 14	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP336	Аналоговый	5 ... 15	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP337	Аналоговый	5 ... 15	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP338x	Аналоговый	5 ... 15	± 50	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik
TP339x	Аналоговый	5 ... 15	± 45	4	1,2 ... 12	Roithner Lasertechnik

З ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РЕБ ПРОТИ БПЛА З ВИЗНАЧЕННЯМ НА ЯКІ ЕЛЕКТРОННІ СКЛАДОВІ Й ЯК ВОНИ ВПЛИВАЮТЬ

3.1 Особливості протидії БПЛА засобами РЕБ

Ураження БПЛА засобами ЗРК ППО, у більшості випадків, є низькоефективним, при цьому призводить до високої витрати боєприпасів – важливого матеріального ресурсу, оскільки, навіть, один снаряд до ЗРК ППО може коштувати в десятки, а то і в сотні разів дорожче за БПЛА. В зв'язку з цим перспективним напрямком протидії БПЛА вважається застосування засобів РЕБ, зображеного на рисунку 3.1, ресурс яких, за наявності зовнішнього живлення, практично необмежений [23].

При цьому засоби РЕБ можуть застосовуватися одним із кількох способів або їх комбінацією:

- придушення або нав'язування неправдивих режимів роботи КРУ і радіолініям передачі даних БПЛА;
- придушення або нав'язування хибних режимів роботи каналу навігації БПЛА, що ґрунтується на прийомі та обробці сигналів однієї або декількох СРНС (рис.3.1).



Рисунок 3.1 – Установки РЕБ на шасі різної військової техніки

Етапу застосування засобів РЕБ передуює розкриття засобами РТРР факту польоту БПЛА як ДРВ, розкриття сигнально-частотних параметрів КРУ та сигналів СРНС, які потенційно можуть бути використані для навігації БПЛА в даному районі. Ці сигнально-частотні параметри передаються засобам РЕБ в якості цілевказівки.

Застосування засобів РЕБ проти БПЛА порівняно із засобами вогневого ураження має такі переваги:

- у процесі застосування засоби РЕБ не витрачають будь-яких матеріальних засобів ураження, а лише поновлюваний ресурс електромагнітної енергії;

- сучасні засоби РЕБ можуть формувати широку номенклатуру радіоелектронних завад, адаптивно обираючи ті з них, які максимальною мірою ефективні відносно конкретних об'єктів придушення;

- засоби РЕБ володіють площинним ефектом, що дозволяє одночасно вражати велику кількість БПЛА, що мають подібне РЕВ, єдину КРУ, принципи навігації, засновані на використанні сигналів одних і тих же СРНС;

- за умови успішного виявлення цілей, як окремих ДРВ, засоби РЕБ можуть бути вибірковими, пригнічуючи тільки ДРВ з певними параметрами, наприклад, ПУ БПЛА, що формує КРУ з певною структурою сигналів, або певною структурою сигналів, або сигнали певної СРНС;

- в окремих випадках, за умови успішного розкриття структури сигналів і формату переданих повідомлень у КРУ і в каналі навігації, засоби РЕБ дають змогу перехопити керування БПЛА і нав'язати йому хибну траєкторію польоту (рис. 3.2) [23, 29].

Разом з тим, одночасно з вищевказаними перевагами, засобам РЕБ властиві й певні недоліки:

- вплив засобів РЕБ можливий тільки за умови дотримання електромагнітної доступності БПЛА;

- придушення каналу управління і навігації БПЛА можливе тільки за умови активного дистанційного керування БПЛА. з використанням навігації

за сигналами СРНС. Політ БПЛА в режимі мовчання за завчасно закладеною програмою, як правило;

– не дозволяє розкрити факт польоту такого БПЛА засобами РРТР і відповідно, сформуванати цілевказівки засобам РЕБ на протидію таким БПЛА;



Рисунок 3.2 – Загальна класифікація радіоелектронних перешкод

– застосування засобів РЕБ проти БПЛА в умовах мирного часу обмежено відносно невеликою потужністю, внаслідок необхідності виконання вимог щодо електромагнітної сумісності (ЕМС) з іншими РЕЗ. Ці РЕЗ можуть перебувати як на об'єкті, що захищається від БПЛА, так і можуть бути іншими засобами протидії БПЛА, які, поряд із засобами РЕБ, інтегровані в комплекс протидії, наприклад, РЛС або засоби РРТР виявлення БПЛА;

– енергетична ефективність засобів РЕБ убиває пропорційно до квадрату відстані, внаслідок цього засоби РЕБ є засобами ближньої дії, причому їхня ефективність зростає в міру наближення БПЛА до місця розташування засобів РЕБ (контрольованого рубежу);

– загороджувальні завади, що володіють «площинним ефектом» і орієнтовані на придушення декількох каналів управління та навігації, одночасно з цим мають і низьку енергетичну ефективність, особливо, в умовах використання для управління та навігації БПЛА широкосмугових сигналів (ШСС) та сигналів із псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (ППРЧ);

– завади, прицільні за частотою і структурою сигналів КРУ і СРНС, які є найбільш ефективними для порушення управління БПЛА, зокрема, шляхом нав'язування хибних режимів польоту. Такий тип перешкод для свого формування вимагає або оперативного розкриття засобами РРТР структури сигналів і формату переданих повідомлень у КРУ і в каналі навігації, або завчасного формування баз даних (БД) відповідних сигналів, використовуваних БПЛА. У результаті, такі високоефективні завади, можуть ефективно бути використані тільки проти обмеженого числа окремих моделей БПЛА, а засновані на цих перешкодах способи тиску - як окремі режими, більш придатні для демонстрації можливостей засобів РЕБ, ніж для реальної протидії атаки групою БПЛА;

– ефективність засобів РЕБ суттєво залежить від сценарію застосування БПЛА, профілю їхнього польоту, рівня автономності тощо. Початкове

врахування в сценарії застосування БПЛА можливості використання проти них засобів РЕБ, вибір профілю польоту на низькій висоті, з урахуванням будови місцевості, завчасне формування для навігаційної системи профілю польоту за електронною мапою місцевості, дотримання режиму «радіомовчання», а також застосування інших способів радіоелектронного захисту БПЛА, суттєво знижує можливості засобів РЕБ [23, 29].

Основним недоліком засобів РЕБ, заснованих на придушенні каналів управління і навігації БПЛА радіоелектронними перешкодами, є те, що випромінювання відповідних перешкод ніяк не гарантує необхідної реакції БПЛА на подібний вплив, а саме - припинення польоту в напрямку об'єкта, що захищається. Дії БПЛА в результаті впливу можуть варіюватися в широкому діапазоні, від продовження польоту по заданій траєкторії (наприклад, за рахунок використання лазерного висотоміра та електронної карти місцевості) до отримання режиму повернення «на своїй траєкторії».

3.2 Тактично-технічні характеристики типових засобів РЕБ

Від початку війни в Україні відбулося зростання загрози з боку БПЛА, що призвело до різкого підвищення пропозицій, з боку виробників відповідних засобів. Це показує, що в даний час доступний широкий спектр комплексів РЕБ, спеціально орієнтованих на протидію БПЛА. До таких комплексів можна віднести комплекси старих радянських зразків РЕБ: «Р-330», «Лиман», «Алтаєць», «Р-330МР», «Арбалет МР», БКО «Талісман», та нових українських розробок, такі як: «Покрова», «Буковель-АД», «Анклав», «Хмара», «Нота», «Полонез» та багато інших.

При цьому дані комплекси можна чітко розділити на три типи, кожен з яких має принципово різні можливості та особливості застосування:

– бойові комплекси РЕБ, що мають відносно високий енергетичний потенціал і велику дальність дії, які орієнтовані на застосування в умовах

мирного і воєнного часу проти БПЛА, у тому числі, спеціального та військового призначення;

- комерційні комплекси РЕП, що мають відносно невисокий енергетичний потенціал та середню дальність дії, орієнтовані на захист периметру критичних об'єктів від малих БПЛА;

- малогабаритні переносні засоби РЕП, що мають відносно низький енергетичний потенціал та малу дальність дії, які орієнтовані на використання однією людиною проти одного, або декілька БПЛА [24, 25].

3.2.1 Бойові комплекси РЕБ.

Наземними комплексами РЕБ комплектуються відповідні батальйони мотопіхотних і бронетанкових дивізій. Ці комплекси призначені для виявлення і радіоелектронного придушення систем і засобів коротких хвиль і ультракоротких хвиль радіозв'язку, а також РЛС у тактичній ланці управління в частинах сухопутних військ, в армійській і фронтовій авіації на дальності до 100 км.

Типовий комплекс РЕБ виконує такі завдання :

- ведення радіо та радіотехнічну розвідку;
- обробку розвідувальних даних і формування карти поточної радіоелектронної обстановки ;
- визначення параметрів і координат ДРВ для забезпечення цілевказівки та оцінки ефективності придушення;
- здійснення радіоелектронного придушення засобів зв'язку та радіолокації в зоні своєї відповідальності.

Як правило, сучасні комплекси РЕБ складаються з двох підсистем:

- повітряна підсистема (на основі засобів РРТР, розміщених на вертольотах або літаках армійської авіації та/або на тактичних БПЛА);
- наземна підсистема (на основі територіально-розподіленого угруповання засобів РЕБ).

Повітряна підсистема комплексу РЕБ забезпечує ведення РРТР, а також РЕБ об'єктів, що знаходяться на відстані 15-30 км від місць розміщення

елементів наземної підсистеми комплексу РЕБ. В якості носіїв засобів повітряної підсистеми виступають вертольоти, літаки і тактичні БПЛА. Повітряна підсистема здатна виявляти, ідентифікувати, визначати місце розташування, а також здійснювати радіоелектронне придушення ДРВ.

Узагальнені ТТХ засобів РРТР повітряної підсистеми РЕБ [26]:

- діапазон частот, в якому ведеться РРТР: 1,5-3000 МГц;
- зона ведення розвідки: 150x50 км;
- точність пеленгування: 0.5° - 1° ;
- точність визначення місця розташування ІРІ: на відстані до 40 км 150-500 м; на відстані 80-120 км - 450-1500 м.

ТТХ засобів РЕБ повітряної підсистеми комплексу РЕБ [26]:

- діапазон частот , в якому ведеться придушення : від 20МГц до 450 МГц :

- потужність випромінювання перешкод: від 40 до 150 Вт;
- ширина миттєво пригнічуваної смуги частот: від 10 до 25 кГц.

Радіорозвідка і постановка радіоперешкод засобами повітряної підсистеми здійснюються з висоти польоту від 60 до 180 м протягом 2-2,5 год на видаленні від 5 до 15 км від лінії зіткнення військ і на глибину до 30 км [26].

Наземна підсистема забезпечує розкриття радіоелектронної обстановки перешкод для ліній радіозв'язку переважно в УКХ-діапазоні, за координації спільних дій засобів РРТР і РЕБ наземної та повітряної підсистем.

Типові ТТХ засобів РРТР наземної підсистеми комплексу РЕБ [26, 27]:

- діапазон частот, в якому ведеться радіорозвідка: від 20 до 15000 МГц;
- зона ведення розвідки: 150 км× 120 км;
- миттєва смуга огляду: близько 2,5 ГГц;
- роздільна здатність: не гірше 1 кГц;
- швидкість пошуку в розвідувальному діапазоні: близько 3000 кГц/ с;
- чутливість (при відношенні сигнал/шум на вході приймача не менше 10 дБ у смузі частот 20 кГц) : не гірше 5 мкВ/м ;

– імовірність розпізнавання виду сигналу і типу РЕЗ за час 0,2 с: не менше 0,8;

– точність пеленгування: $0,5^{\circ}$ - 1° .

Типові ТТХ засобів придушення наземної підсистеми комплексу РЕБ [26, 27]:

– діапазон частот, у якому ведеться придушення: від 1,5 до 2500 МГц (перспективних зразках - до 6 ГГц);

– потужність випромінювання перешкод: від 0,5 до 1 кВт;

– висота антени засобів РЗП: від 6 до 20 м;

– кількість одночасно пригнічуваних цілей : від 5 до 300;

– ширина спектра завад: прицільних за частотою від 3 до 50 кГц; загороджувальних від 150 до 3000 кГц;

– час реакції при постановці перешкод : по невідомій частоті 0,8 с ; по відомим частотам 0,04 с;

– виявлення і придушення РЕЗ з режимом ППРЧ до 1000 стрибків/с ;

– дальність придушення: до 100 км.

Необхідно зазначити, що вищевказані ТТХ відносяться до комплексів РЕБ загального призначення. Разом з тим, останнім часом на озброєння активно надходять комплекси РЕБ, спеціально орієнтовані на протидію саме БПЛА (рис. 3.3) [28].

ТТХ бойового комплексу РЕБ, орієнтованого на протидію БПЛА.

ТТХ підсистеми РРТР:

– діапазон частот , в якому ведеться РРТР: від 200 до 6000 МГц ;

– дальність розвідки ПУ БПЛА: до від 10 до 30 км;

– дальність розвідки БПЛА: від 30 до 50 км;

– ймовірність пеленгування сигналів типу ППРЧ зі швидкістю не менше ніж 1000 стрибків/с: не менше 0,85;

– середньоквадратична помилка пеленгування ДРВ в діапазоні від 200 до 6000 МГц: не більше 2° .

ТТХ підсистеми РЕБ:

а) діапазон частот, в якому ведеться придушення: від 200 до 6000 МГц;



Рисунок 3.3 – Високомобільний комплекс РЕБ «Полонез» відчизняного українського оборонпрому

б) придушення літерних частот:

1) частоти типових каналів неліцензованих засобів радіозв'язку: від 20 до 80, від 135 до 174, від 400 до 470 МГц;

2) частоти типових каналів авіаційного радіозв'язку в діапазоні 220-400 МГц;

3) 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);

4) частоти каналів «вниз» супутникових систем зв'язку (ССС) L-діапазону: Інмарсат (1518-1660,5 МГц), Ірідіум (1616-1626,5 МГц);

5) частоти каналів СРНС: GPS (L1 - 1575,42 МГц/ L2 - 1227,6 МГц/ L5 - 1176,45 МГц), ГЛОНАСС (L1 - 1602 МГц / L2 - 1246 МГц/ L5 - 1176,45 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);

а) дальність придушення приймальних трактів:

1) засобів зв'язку на ПУ: від 10 до 25 км;

2) засобів зв'язку на БПЛА: від 30 до 50 км;

3) каналу СРНС на БПЛА: від 30 до 50 км;

б) енергопотенціал впливу:

1) на канал передачі даних «БПЛА – ПУ»: від 300 до 500 Вт;

2) на канал керування «ПУ – БПЛА» та телеметрії «БПЛА – ПУ»: від 500 до 1000 Вт;

3) на канал СРНС на БПЛА: від 300 до 1000 Вт;

в) тип формованих перешкод:

1) для каналів зв'язку та управління: прицільна і ковзна за частотою, загороджувальна за діапазоном частот;

2) для каналу навігації за СРНС: прицільна за частотою і структурою сигналу з метою формування помилкової навігаційної інформації (за відкритими частотами СРНС); шумова прицільна за частотою (за відкритими або закритими частотами СРНС).

Зазначимо, що в 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, як правило, детально не розкривають механізми такого «перехоплення», і що конкретно під ним розуміється. Більш детально можливість формування хибних режимів роботи для каналів управління та навігації БПЛА буде розглянуто далі, тут же необхідно зазначити, що подібна функціональність може бути реалізована стосовно виключно окремих типів БПЛА, принципи функціонування яких були завчасно вивчені, і відповідно до них було сформовано відповідні програми «перехоплення управління» [23].

Загалом бойові комплекси РЕБ протидії БПЛА є ефективним засобом розв'язання задач придушення каналів керування й навігації. Недостатня «інтелектуальність» постановки завдань у даних комплексах компенсується їхніми високими енергетичними можливостями та універсальністю застосування по відношенню до всіх типів БПЛА.

Недоліком даних комплексів є низький рівень ЕМС по відношенню до інших РЕВ зв'язку та навігації в зоні застосування, що робить практично неможливим їх широке використання для протидії БПЛА в умовах мирного часу.

3.2.2 Комерційні комплекси РЕБ.

Необхідність забезпечення захисту критичної інфраструктури та важливих об'єктів у мирний час, при забезпеченні вимог ЕМС з існуючими зв'язковими та навігаційними РЕВ, призвела до формування окремого напрямку в галузі протидії БПЛА, який полягає в створенні, так званих, комерційних комплексів РЕБ.

Відмінними рисами комерційних комплексів РЕБ, порівняно з бойовими, є:

- відносно невисокий енергопотенціал, у зв'язку чим – менша дальність дії, при одночасному забезпеченні вимог ЕМС за межами зони придушення;
- використання спрямованих антенних систем, які дають змогу створення пригнічуваних секторів і контрольованого периметра;

– використання для розкриття факту польоту БПЛА і контролю їхньої траєкторії невидимих засобів - як засобів РРТР, так і пасивних РЛС, заснованих на прийомі відбитих сигналів від зовнішніх джерел радіовипромінювання, наприклад, від ретрансляційних телевізійних вишок;

– використання режимів придушення каналів управління БПЛА, що базуються не на загороджувальних перешкодах, які перекривають окремий діапазон частот ;

– використання режимів «розкриття» каналів управління, заснованих на автоматичному визначенні типу протоколу, з числа найбільш широко використовуваних, з подальшим використанням відомих вразливостей у них;

– використання режимів придушення і нав'язування помилкових режимів роботи каналів навігації БПЛА, заснованих на формуванні шумових завад, прицільних за частотою, для закритих каналів СРНС.

Аналіз цих відмінних рис комерційних комплексів РЕБ відносно бойових дозволяє зробити висновок про те, що, з одного боку, дані комплекси реалізують більш «інтелектуальні» режими протидії БПЛА, засновані на імітаційних завадах, прицільних за частотою і структурою широко розповсюджених корисних сигналів управління і навігації БПЛА (рис. 3.4).

З іншого боку, ці комплекси втратили істотну частину універсальності застосування та орієнтовані насамперед на широке розповсюдження комерційних доступних малих БПЛА, обладнані виключно стандартними засобами зв'язку (на основі стандартів 2G ... 4G та Wi-Fi) та навігації за СРНС [23].

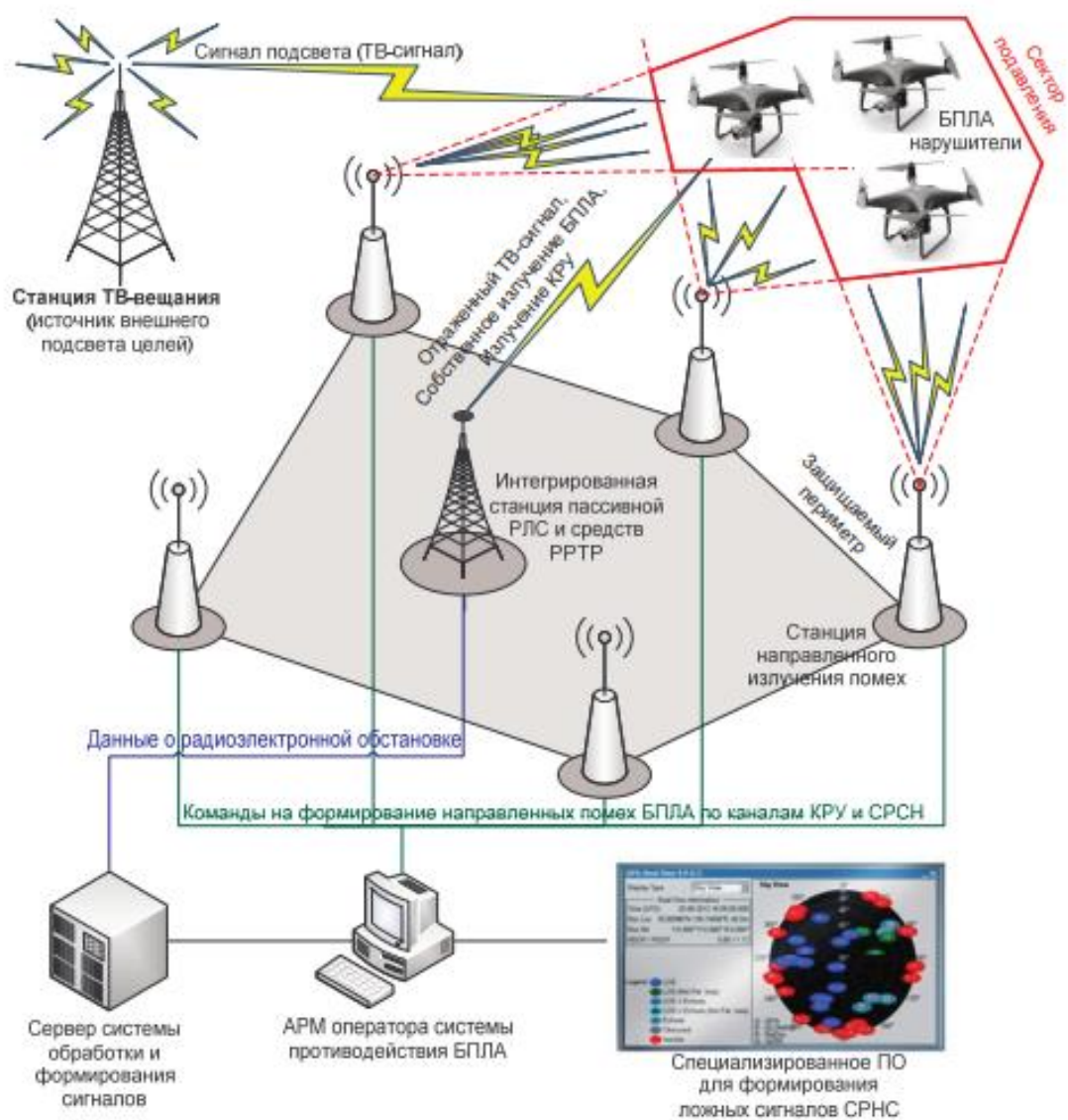


Рисунок 3.4 – Принцип функціонування системи протидії БПЛА

ТТХ комерційного комплексу РЕП, орієнтованого на протидію БПЛА.

ТТХ підсистеми розвідки:

а) ведення розвідки БПЛА:

1) РРТР каналів зв'язку та управління БПЛА;

2) використання РЛС з пасивним або активним принципом підсвічування цілей;

3) використання оптико-електронного засобу (ОЕЗ) у видимому та інфрачервоному-діапазоні;

б) дальність виявлення БПЛА:

- 1) засобами РРТР: від 5 до 10 км;
- 2) шляхом використання РЛС: від 8 до 30 км;
- 3) шляхом використання ОЕЗ (у видимому діапазоні з оптичним збільшенням) : від 3 до 5 км;

в) літерні частоти широко розповсюджених засобів зв'язку, на яких ведеться РРТР каналів управління БПЛА:

- 1) RC433: 433 МГц;
- 2) мережі 4G: від 725 до 770, від 790 до 830, від 850 до 894 МГц;
- 3) мережі CDMA: 850-894 МГц;
- 4) RC868: 868-916 МГц;
- 5) GSM900: від 890 до 915, від 935 до 960 МГц;
- 6) GSM1800: від 1710 до 1880 МГц;
- 7) мережі 3G: від 2110 до 2170 МГц;
- 8) мережі Wi-Fi на базовій частоті 2,4 ГГц: від 2,4 до 2,5 ГГц;
- 9) мережі 4G: від 2,5 до 2,7 ГГц;
- 10) мережі Wi-Fi на базовій частоті 5,2 ГГц: від 4,9 до 5,5 ГГц;
- 11) мережі Wi-Fi на базовій частоті 5,8 ГГц: від 5,5 до 6,1 ГГц.

ТТХ підсистеми РЕБ:

а) літерні частоти широко розповсюджених засобів зв'язку, на котрих ведеться придушення:

- 1) частоти типових каналів комерційних систем зв'язку;
- 2) частоти каналів навігації за СРСН;
- 3) дальність придушення приймальних трактів засобів зв'язку та засобів навігації по СРСН на БПЛА: до 6 км;
- 4) енергопотенціал впливу: від 5 до 10 Вт;
- 5) спрямованість антен: спрямовані антени з шириною головної пелюстки діаграми спрямованості від 45° до 90°;

б) типи формованих перешкод:

- 1) для «закритих» каналів зв'язку та управління, що мають криптографічний захист: шумова завада, прицільна за частотою;

2) для «відкритих» каналів зв'язку та управління або каналів, що мають типові вразливості в протоколах шифрування: імітована завада, прицільна за частотою і структурою корисного сигналу, з метою нав'язування хибних режимів роботи;

3) для «відкритих» каналів навігації по СРНС: шумова завада, прицільна за частотою; імітуюча завада, прицільна за частотою і структурою корисного сигналу, з метою нав'язування хибних траєкторій польоту.

Загалом комерційні комплекси РЕБ для протидії БПЛА є ефективним засобом вирішення завдань придушення каналів управління і навігації винятково широко розповсюджених малих комерційних БПЛА. Наявність апріорних даних про стандарти зв'язку, що використовуються для управління БПЛА (в основному це канали Wi-Fi на опорних частотах 2,4, 5,2 і 5,8 ГГц), а також про вразливості криптографічних протоколів захисту, вбудовані в ці стандарти (WEP, WPA та ін.), дозволяє виробникам комплексів РЕБ реалізовувати в них режими автоматичного «зламу» каналів управління, з подальшим формуванням для них перешкод, прицільних за частотою і структурою корисного сигналу, що імітують команди управління «посадка», або «зниження». Теж саме стосується і можливостей комерційних комплексів РЕБ щодо придушення каналів навігації по СРНС. Однак така сувора орієнтованість комплексів на малі комерційні БПЛА, істотно знижує можливості даних комплексів з протидії БПЛА, що мають інші, відмінні від широко використовуваних, частоти і стандарти каналів управління.

3.2.3 Малогабаритні переносні засоби РЕБ.

Малогабаритні засоби РЕБ, у форматі різного роду «електронних автоматів» чи «електронних гвинтівок» з регулярною постійністю стали презентуватися починаючи з 2015 р., коли проблемі протидії БПЛА стали приділяти підвищену увагу (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Піранья 3 РАДК (антидронний мобільний три діапазонний переносний комплекс спрямованому захисту, призначений для знешкодження ворожих БПЛА)

Відмінними рисами цих засобів РЕБ, порівняно з бойовими і комерційними комплексами, є:

- відсутність будь-якої розвідувальної підсистеми, що розкриває параметри каналів управління БПЛА;
- використання для придушення шумових завад, прицільних за частотою широко розповсюджених каналів навігації СРНС і каналів зв'язку з малими БПЛА;
- малий енергопотенціал, у зв'язку з чим - мала дальність дії;
- використання спрямованих антенних систем, що збігаються за орієнтацією з напрямком самого пристрою;
- використання у складі засобів РЕБ акумуляторних батарей з обмеженим боєзапасом на кілька годин епізодичного застосування;
- для деяких мобільних засобів РЕП вказуються медичні обмеження на тривалість застосування даних пристроїв людиною-оператором, зважаючи на негативний вплив електромагнітного випромінювання.

ТТХ таких засобів, орієнтованих на протидію БПЛА:

а) літерні частоти широко розповсюджених засобів зв'язку, на яких ведеться придушення:

- 1) частоти типових каналів комерційних систем зв'язку;
 - 2) частоти каналів навігації по СРНС;
 - 3) дальність придушення приймальних трактів засобів зв'язку та засобів навігації по СРСН на БПЛА: від 0,4 до 2 км ;
 - 4) енергопотенціал впливу: від 5 до 10 Вт ;
 - 5) тип формованих перешкод: шумова або ковзаюча перешкода, прицільна по частотах каналів засобів зв'язку і каналів СРСН;
- б) маса: 2,5-6,5 кг;
- 7) час безперервної роботи: 0,5-4,5 год.

Аналіз відмінних рис малогабаритних засобів РЕБ та їхніх ТТХ, дозволяє зробити висновок, що ці засоби є найменш інтелектуальними та найменш ефективними при розв'язанні задачі протидії малим БПЛА.

З одного боку, простота і мобільність цих засобів дозволяє їх застосовувати окремим людям-операторам без спеціалізованого навчання, з іншого боку, дані засоби можуть застосовуватися тільки епізодично і орієнтовані на найпростіші малі БПЛА. При цьому відсутність у функціоналі даних пристроїв режимів формування імітуючих завад по каналу навігації СРНС, призводить до того, що поведінка БПЛА, в умовах «грубого» шумового придушення каналів управління навігації, стає фактично непередбачуваним. Незважаючи на декларування виробниками подібних пристроїв таких ефектів як падіння БПЛА, приземлення БПЛА або повернення БПЛА до ПУ. Фактична поведінка БПЛА визначається програмою їхніх дій у разі відсутності зв'язку та може суттєво відрізнятись від вищевказаних, аж до продовження польоту відповідно до завчасно заданої програми [23].

4 ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ ВПЛИВУ НА НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ БПЛА

4.1 Проблемні питання радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА

При розгляді питання впливу на канал навігації БПЛА необхідно враховувати, що навігаційна система БПЛА може мати різний ступінь складності й треба враховувати для визначення місця розташування БПЛА декілька сигналів, що надходять від датчиків різної фізичної природи:

– навігаційна система, що базується тільки на апаратурі споживача (АС) найпоширеніших СРНС - така система характерна для найпростіших малих БПЛА- квадрокоптерів;

– проста інтегрована навігаційна система, на основі комплексування даних мікромеханічних інерціальних навігаційних систем (ІНС) та АС СРНС - така навігаційна система характерна для широкого класу малих БПЛА- квадрокоптерів для професійного використання в різних цілях;

– інтегрована навігаційна система, на основі комплексування даних декількох навігаційних пристроїв: мікромеханічних ІНС, АС СРНС, барометричного висотоміра, радіо або лазерного висотоміра - така навігаційна система характерна для професіональних малих БПЛА, а також для БПЛА середнього класу;

– інтегрована система, на основі комплексування даних декількох навігаційних пристроїв: авіаційних ІНС АП СРНС, висотомірів (барометричного та радіо), РСБН VOR/DME (Very high frequency Omni directional radio Range/Distance Measuring Equipment), системи АЗН-В - така навігаційна система фактично повністю повторює навігаційну систему пілотованого ЛА і характерна для БПЛА важкого класу.

Говорячи про придушення каналу навігації БПЛА, необхідно чітко розуміти, що сам факт радіоелектронного впливу (придушення або

нав'язування неправдивих режимів роботи) стосується лише сигналів, що приймаються АС від одного або декількох СРНС, що відповідають тільки одному каналу з усієї множини каналів надходження даних у навігаційну систему БПЛА [23].

Таким чином з використанням РЕБ можливо забезпечити значуще порушення роботи тільки найбільш простих навігаційних систем БПЛА (типу 1-3 зі списку). Для БПЛА з повноцінною інтегрованою навігаційною системою (типу 4 зі списку), що ґрунтується на використанні декількох каналів отримання навігаційних даних, порушення супутникового каналу (в тому числі й надходження по ньому неправдивих навігаційних даних, що вступають у протиріччя з даними інших каналів), у більшості випадків буде виявлено, після чого навігаційна система перестане використовувати супутниковий канал для визначення місця розташування БПЛА. Зазначимо, що в середніх і важких БПЛА, в більшості випадків, у якості основного каналу формування навігаційних даних використовується інформація саме від авіаційних ІНС на основі лазерних або волоконно-оптичних гіроскопів.

Дані ІНС у середньому забезпечують похибку обчислення шляху порядку 1,85 км за 1 годину польоту . При цьому інформація по інших каналах (дані від АС СРНС, дані висотомірів, сигнали РСБН і АЗН-В) є вторинною і після верифікації та комплексування вона використовується тільки для корекції показань [30, 31].

Додатково зазначимо, що середні та великі БПЛА використовуються для вирішення спеціальних та військових завдань, при цьому в них АС СРНБ використовує не «відкриті», а «закриті» сигнали СРНС, які мають вищу завадозахищеність і криптозахист. При цьому обладнання навігаційних супутників може формувати окремі завадозахищені зони. Наприклад, функціонал супутників GPS-III передбачає можливість формування окремих зон з підвищеною на 20 дБ енергетикою сигналів «закритих каналів» . Внаслідок цього завдання порушення коректного функціонування

навігаційних систем таких БПЛА стає ще більш скрутним, фактично не можливим [32].

Швидкий розвиток БПЛА призводить до вдосконалення їх навігаційного забезпечення, в тому числі, для застосування в умовах поганого прийому сигналів СРНС.

До таких напрямів удосконалення належать такі:

– використання для підвищення точності навігації багатостанційних локальних РСБН або систем-імітаторів сигналів СРНС, при цьому станції цих систем можуть бути мобільними, перебуваючи на автомобілях, і завчасно розгортатися в зоні планованого застосування БПЛА. Зокрема, використання подібних систем дозволило підвищити відношення сигнал/шум (ВСШ) на 35-50 дБ у зоні придушення (або поганого прийому) сигналів СРНС і забезпечити прийом навігаційних сигналів при потужностях активних шумових і доплерівських (що звільняють за швидкістю) перешкод у зоні дії РСБН до 100 Вт;

– використання для навігації електронних карт місцевості, політ за якими здійснюється відповідно до даних радіо- або лазерного висотоміра, РЛС або ОЕС видимого діапазону;

– використання для навігації різних автономних систем технічного зору, а також технології SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) - технології автоматичної одночасної побудови карти місцевості в маловідомому просторі, контролю поточного місця розташування БПЛА та пройденого шляху;

– автономний прямолінійний політ БПЛА в напрямі цілі, що засвічується зовнішнім джерелом випромінювання.

Таким чином, узагальнюючи вищенаведене, можна зробити висновок, що застосування засобів РЕБ, у тому числі й шляхом формування інтелектуальних завад, прицільних за частотою і структурою сигналів СРНС, з метою нав'язування їм хибного самовизначення і траєкторії польоту, орієнтоване на малі БПЛА з найпростішими навігаційними системами. При

цьому високий темп розвитку БПЛА, а також можливість розроблення в найближчому майбутньому навігаційних систем на основі електронних карт місцевості або систем технічного зору, зробить придушення каналів СРНС марним навіть проти малих БПЛА.

4.2 Особливості радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, що базується на прийомі сигналів СРНС

Систему навігації на переважній кількості малих БПЛА становить АС, що приймає сигнали однієї або декількох СРНС. До найпоширеніших СРНС відносяться системи: GPS/NAVSTAR (США), ГЛОНАСС (Росія), Beidou (Китай), Galileo (RC). Сигнали СРНС формуються на літерних частотах у діапазоні від 1,1 до 1,6 ГГц. Як правило, прості навігаційні системи, встановлювані на малих БПЛА, використовують інтегрований режим опрацювання сигналів від декількох СРНС, що забезпечує точність навігації від 1 до 2,5 м як у горизонтальній площині, так і по висоті [23, 33, 34].

Узагальнюючи матеріал можна зробити такі висновки.

Серед завад, використовуваних для придушення каналів СРНС, у найбільш широкому ступені застосовуються:

- шумова перешкода - білий шум високої потужності на частотах каналів СРНС;
- гармонійна (полігармонійна) завада - одночасне або модульоване гармонійне коливання на частоті корисного сигналу ;
- прицільно імітуюча завада - завада, що імітує структуру сигналів СРНС із частотною та кременною неузгодженістю, а також із фіксованим значенням фази огинаючої маніпулюючої функції;
- слідкуюча імітуюча завада – імітує структуру сигналів СРНС, але зі змінною початковою фазою маніпулювальної функції, закон зміни якої відповідає зміні відстані від приймача до станції РЕП;

– загороджувальна імітуюча завада - імітує набір сигналів супутників СРНС з однаковою частотною неузгодженістю для всіх компонентів і різною часовою неузгодженістю для кожного з компонента.

Для організації імітуючих завод потрїбна розвідка не тїльки неїснуючої частоти і фази, а й амплїтуди сигналів СРНС, а також манїпулюючих функцій, що являють собою кодову послїдовнїсть для подїлу сигналів і навігаційних даних. При цьому для формування наступної та прицїльної імітуючої завади необхідна розвідка частотних, фазових і часових параметрїв корисних сигналів СРНС. Простїшою в реалїзацї є загороджувальна імітуюча завада, оскїльки вона не вимагає для формування точних даних часових параметрїв сигналу [35].

Найбїльш ефективними заводами для порушення нормального функціонування АС СРНС є імітуючі завади, що вїдтворюють структуру реального сигналу СРНС із частотними, фазовими та часовими параметрами, що дають змогу нав'язати АС СРНС неправдивий режим роботи і як наслїдок - хибне мїсцезнаходження БПЛА. Модифїкацї значущих параметрїв завади, що імітує перешкоду, дають змогу керувати траєкторїєю польоту БПЛА.

При цьому значущї параметри перешкоди мають бути якомога ближчими до вїдповїдних параметрїв реальних сигналів СРНС.

Постановка імітаційних перешкод проводиться в два етапи:

– постановка шумової завади, загороджувальної по каналам СРНС – викликає «вїдв'язку» АС вїд поточних сигналів СРНС, переривання режиму стеження і перехоплення, в режим виявлення і пошуку сигналїв;

– формування імітуючої завади з високим енергетичним потенціалом - викликає «прив'язку» АС СРНС до хибних сигналїв з подальшим переходом у хибний режим роботи.

Щоб наглядно побачити рїзницю в подавленї каналїв АС СРНС звернїмося до таблицї 4.1, в якїй представленї результати дослїджень придушення каналїв АС СРНС при використаннї рїзних типїв завод для ситуацїй, коли АС функціонує автономно у штатному режимї(Табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Результати досліджень придушення каналів АС СРНС при використанні різних типів завад для ситуацій, коли АС функціонує автономно у штатному режимі

Канал АП СРНС	Тип помехи	Вероятность успешного подавления канала АП	Требуемый энергопотенциал станции РЭП, $P_{ПП}G_{ПП}$, дБВт
Канал обнаружения	Шумовая	0,5	8,5
	Гармоническая	0,5	8,5
	Заградительная имитирующая	0,67	-3,6...-9,5
Канал слежения за частотой	Шумовая	0,32	19,5
	Гармоническая	0,32	24,4
Канал слежения за задержкой сигнала	Шумовая	0,5	10,4
	Гармоническая	0,5	54
	Заградительная имитирующая	0,67	-3,6...-9,5
Квадратичный детектор	Шумовая	0,1	18,7
	Гармоническая	0,1	18,7

З наведених у таблиці результатів випливає, що з усіх розглянутих завад найменший енергетичний потенціал станції РЕБ потребує при постановці загороджувальної імітуючої завади. При впливі загороджувальної імітуючої перешкоди на канал виявлення і канал стеження за затримкою, ймовірність придушення АС СРНС становитиме близько 0,9. При постановці шумової або гармонійної завади з енергетичним потенціалом станцій РЕБ, що дорівнює 8,5 дБВт, ймовірність придушення АС СРНС становитиме близько 0,5. З метою збільшення ймовірності придушення АС РЕБ необхідно при встановленні шумових завад мати енергетичний потенціал станцій РЕБ близько 20 дБВт, а при встановленні гармонійних завад - близько 25 дБВт [36].

4.3 Особливості радіоелектронного придушення інтегрованої навігаційної системи БПЛА, заснованої на комплексуванні даних мікромеханічних інерціальних систем і сигналів СРНС

Вище було розглянуто навігаційні системи найпростіших малих БПЛА, засновані на прийомі та обробці сигналів СРНС. На більш складних БПЛА встановлюються елементи автонавігаційної системи - акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри тощо. Загальноприйнятою нормою точності авіаційних інерціальних ІНС середньої точності є помилка обчислення шляху в 1,85 км за 1 годину польоту. Така точність досягається авіаційними ІНС на основі лазерних або волоконно-оптичних гіроскопів. Однак маса таких ІНС становить від 8 кг, що робить проблематичним їхнє використання на малих і навіть на середніх БПЛА.

У результаті на малих БПЛА встановлюється простіша ІПС, оснащена мікромеханічними датчиками руху - акселерометрами та гіроскопами. Така ІНС, без її корекції за сигналами СРНС, не в змозі здійснювати автономне обчислення пройденого шляху через високі швидкості дрейфу гіроскопічних датчиків. Накопичувана помилка мікромеханічних ІНС, в умовах відсутності коригувальних сигналів СРНС, за 1 хв становить до 3 м по горизонталі та 2 м по вертикалі. Таким чином, ці ІНС здатні без сигналів СРНС підтримувати прийнятну точність польоту на рівні від 100 до 150 м протягом не більше 10 хв. При цьому, як правило, є на увазі підтримання режиму прямолінійного польоту без прискорень і маневрів.

Прикладами таких зразків мікромеханічних ІНС можуть бути пристрої Geo - iNAV (маса близько 3 кг). Таким чином на сучасному етапі розвитку навігаційних систем малих БПЛА для обчислення шляху з прийнятною точністю потрібне використання сигналів СРНС [30].

Додатковими способами підвищення автономності і точності навігаційних систем БПЛА, є встановлення барометра, радіо- або лазерного висотоміра. Приблизний діапазон вимірів простого барометричного

висотоміра для малих БПЛА - до 9 км, точність - 0,1 м, діапазон вимірювань радіовисотоміра до 700 м, точність за висотою 2-5 %, точність за кутом $0,25^\circ$ [37].

Діапазон вимірів лазерного висотоміра від 0,1 до 120 м (статичної поверхні), і від 2 до 40 м (зсувної поверхні), роздільна здатність 1 см, точність 0,1 м (об'єкт з 70 % світловідбиттям при 20°C) [23].

Це обладнання дозволяє підвищити точність визначення координат за рахунок використання додаткових каналів надходження навігаційних даних, а також формувати профілі автономного польоту БПЛА за електронними картами місцевості, що містять барометричні дані або висотні профілі приземної поверхні [31].

У разі утрудненого приймання сигналу СРНС навігаційна система БПЛА переходить у режим «ІНС - ОЕС - барометр – радіовисотомір», причому в цьому випадку ОЕС може бути використано як для автономного контролю польоту за візуальними орієнтирами, так і для організації прямого дистанційного управління оператором за візуальними мапами від ОЕС. За відсутності ОЕС на БПЛА навігаційна система переходить у режим «ІНС - барометр - радіовисотомір», для польоту за барометричною та електронною картою місцевості.

На сьогоднішній час спостерігається відхід від використання ОЕС для прямого керування БПЛА оператором, у напрямі автономного використання ОЕС, а також інших радіотехнічних засобів БПЛА, у режимі SLAM - режим автоматичної одночасної побудови карти місцевості у невідомому просторі та одночасного контролю поточного місцезнаходження БПЛА, а також вирахування пройденого шляху.

Відповідно, всі існуючі системи РЕБ, а також такі що створюються, повинні враховувати базові основи побудови мереж зв'язку, систем формування сигналів, систем контролю та керування [38 - 41].

4.4 Можливості акустичного придушення автономної навігаційної системи БПЛА, заснованої на мікромеханічних інерціальних системах

Одним із відносно нових способів порушення нормального функціонування навігаційної системи БПЛА, є вплив на його автономну ІНС штучними коливаннями. Для протидії БПЛА, з вбудованими автономними ІНС з мікромеханічними датчиками, можна використовувати потужні акустичні коливання, які негативно впливають на дрейф гіроскопічних датчиків через ефект резонансу.

Дослідження, проведені вченими з південнокорейського інституту Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), показали, що будучи механічною системою, гіроскоп має свою резонансну частоту. Отже, підібраний за частотою акустичний вплив може викликати резонанс у гіроскопі, що призведе до його неправильної роботи і, як наслідок, до видачі помилкових сигналів показань про місцезнаходження БПЛА.

Експерименти, проведені дослідниками з KAIST, показали, що 7 моделей гіроскопів із 15 найчастіше використовуваних у комерційних малих БПЛА схильні до резонансу. За результатами подальших розрахунків ученими було зроблено такі висновки - звукового впливу потужністю близько 140 дБ на резонансній частоті гіроскопа достатньо, щоб порушити роботу цього приладу на відстані до 40 м від джерела звукового сигналу.

Важливо зазначити, що акустичний вплив на гіроскопи, по-перше, буде ефективним лише проти малих БПЛА, по-друге, такий вплив не завжди призводить до значної дестабілізації БПЛА. Це пов'язано з тим, що в деяких гіроскопах звукове коливання впливає лише на канал орієнтації в горизонтальній площині, який у низці моделей БПЛА продубльований магнітометром для кращої стабілізації польоту. У цьому разі ефективність технічних засобів протидії БПЛА, заснованих на способі акустичного впливу, істотно знижуються [23].

Крім того, саме формування акустичних завад на рівні від 120 до 140 дБ, що відповідає болевому порогу або контузії людини, фактично неможливе в населеній місцевості, а також у складі комплексів, до яких входять люди-оператори. У зв'язку з цим застосування цього способу придушення на практиці вельми ускладнене. Але може бути ефективним при розробці приладу який міг би мати направлений пучок, як у високочастотних динаміках акустичних систем. То тим самим, фактор ризику, отримання людиною травм зменшився б у рази, тому що, весь хвильовий потік був би направлений на ураження БПЛА, а не розносився рівномірно від станції РЕБ у навколишньому середовищі.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі в результаті аналітичного дослідження проведений аналіз стійкості навігаційних систем БПЛА.

Було розглянуто різні типи БПЛА, а саме їх:

- характеристику та конструктивну будову;
- класифікацію та застосування у різних сферах сьогодення.

Розглянуто системи навігації БПЛА, проведено порівняння кожного з типів цих систем, принципи їхньої роботи та специфіку використання.

Також представлено варіанти протидії навігації БПЛА системами радіоелектронної боротьби, як у мирний час так і у військових реаліях.

На сьогоднішній день тематика БПЛА набирає обертів як у цивільному так і у військовому використанні. Тому нові технології та конструкції як і способі керування БПЛА, будуть удосконалюватись з кожним роком, а з ними і системи протидії БПЛА.

Цей напрямок дуже важливий для України, де йде кровопролитна війна, в якій велику роль відіграють безпілотники, як у бойовому ураженні противника, розвідці (виявлення боєкомплекту, моніторингу техніки, та особового складу у тилу противника), так і для доставки різної допомоги, як снарядів та патронів, а також медичного та гуманітарного вантажу у прифронтову та передову зону бойових дій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. – С. 67 – 74.
2. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf>.
3. Сытин Л. Е. Самое современное оружие и боевая техника. — М.: АСТ, 2017. — 656 с. — ISBN 978-5-17-090382-5. – С. 87 – 96.
4. Сэмюэл Грингард. Интернет вещей: Будущее уже здесь = The Internet of Things. — М.: Альпина Паблишер, 2016. — 188 с. — ISBN 978-5-9614-5853-4. – С. 106 – 114.
5. Rajesh Kumar. Tactical Reconnaissance: Uavs Versus Manned Aircraft // The Pennsylvania State University. — 1997. — № AU/ACSC/0349/97—03. — копия Архивная копия от 22 сентября 2017 на Wayback Machine на сайте PennState. – С. 45 – 52.
6. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка . - М .: Воениздат , 2001. - 456 с .- С. 68 – 74.
7. Краш тест дрона. drone2. Дата обращения: 8 июня 2017. Архивировано из оригинала 20 апреля 2018 года. – С. 12 – 14.
8. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация 2019. – С. 89 – 91.
9. Степанов О.О. Особливості побудови та перспективи розвитку навігаційних інерційно-супутникових систем // Інтегровані інерційно-супутникові системи навігації. Зб. статей докл. СПб. 2001.– С. 53 – 58.
10. Мультидисциплинарный сборник научных публикаций, «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы». Выпуск 10(36), г. Москва-2019, 13 октябрь. – С. 24 – 29.
11. Bədəlov A.Z., Nəbiyev R.N., Məmmədov A.Z. Aviasiya cihazları və informasiya-ölçmə sistemləri. Dərslik. Bakı, MAA, 2017. 382 səh. – С. 74 – 76.

12. Bədəlov A.Z., Nəbiyev R.N., Məmmədov A.Z. Uçuş aparatlarının şaquli sürətlərinin ölçülməsinin xüsusiyyətləri. Monoqrafiya. Bakı, MAA, 2018. 208 səh. – С. 43 – 45.
13. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие. – Кировоград: ПОЛИМЕД - Сервис, 2011. – 164с. – С. 7.
14. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Супутникова> навігація.
15. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/gnss/gnss.html>.
16. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. и др.; Под ред. В.С. Шебшаевича. - 2-е изд. М.: Радио и связь, 1993. - 408 с. – С. 187 – 188.
17. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника. - 800 с. – С. 143 – 144.
18. https://studwood.net/2118597/tehnika/uglomerno_dalnomernye_radionavigatsionnye_sistemy.
19. Сосновский А.А. Авиационная радионавигация, справочник. - М. Транспорт, 1990. – С. 36 – 37.
20. Гаврищук В.В. и др. Моделирование и исследование комплексной навигационной системы, содержащей DME, ДВС и датчик курса. Вопросы радиоэлектроники, сер. РЛТ, вып. 2. - М., 2009. – С. 156 – 165.
21. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик / В. М. Ильюшко, М. М. Митрахович, А. В. Самков и др. под общ. ред. В. И. Силкова – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, – 2009 – 302 с. – С. 121 – 123.
22. Распопов В. Я. Микросистемная авионика: учеб. пособие / В. Я. Распопов. Тула: «Гриф и К», – 2010. – 248 с. – С. 84 – 85.
23. Макаренко С.И. , Иванов М.С. , Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб .: - Свое издательство , 2013. - 166 с . – С. 87 – 91.

24. Делянович М. О. Використання безпілотних літальних апаратів у злочинних цілях: методи протидії та боротьби і Правопорядок: історія, теорія, практика. 2019 № 2 (21) – С. 103 – 112.

25. Вироби та комплекси протидії безпілотним літальним апаратам. [Доповідь]. - СПб.: АТ "НДІ "Вектор", 2018. - 51 с . – С. 24 – 28.

26. Макаренко С. І. Інформаційне протиборство і радіоелектронна боротьба в мережецентричних війнах початку ХХІ століття. Монографія. - СПб.: Наукоємні технології, 2017. - 546 с . – С. 204 – 206

27. Оружие и технологии России . Энциклопедия . ХХІ век . Системы управления , связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ . ред . С. Иванова. - М .:Изд . дом « Оружие и технологии » , 2006. - 695 с . – С. 153 – 156.

28. Ясечко М. М. , Очкуренко А. В. , Ковальчук О. О. , Максютя Д. В. Сучасні радіоелектронні засоби боротьби з безпілотними літальними апаратами в зоні проведення АТО // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил . 2015. № 3 (44). – С. 54 – 57.

29. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам . Монография . - СПб .: Научно-технические технологии , 2020. - 204 с . – С. 91 – 117.

30. Семенова Л.Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня . 2018. № 4 (27) . – С. 6 – 8.

31. Щербинин В. В., Связов А. В., Смирнов С.В., Кветкин Г.А. Автономный навигационный комплекс для роботизированных наземных и летательных аппаратов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3 (152). – С. 234 – 243.

32. Веремеенко К.К., Кошелев Б.В. , Соловьев Ю. А. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально - спутниковых навигационных систем // Новости навигации . 2010. № 4. – С. 32 – 41.

33. Филиппов А. А., Бажин Д. А., Хлобыстов А. Н. Повышение эффективности управления беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Информационно - управляющие системы . 2014. – С. 45 – 50.
34. Гришин В. А., Системы технического зрения В решении задач управления беспилотными летательными аппаратами // Датчики и системы. 2009. – С. 46 – 52.
35. Жук А. П., Орел Д. В. Об оценке помехозащищенности спутниковых радионавигационных систем // Инфокоммуникационные технологии . 2012. – С. 83 – 88.
36. Дятлов А. П., Дятлов П.А. , Кульбикаян Б.Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. Монография . - М .: Радио и связь , 2004. - 226 с . – С. 134 – 136.
37. Гэн К., Чулин 11. А. Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей / Машиностроение и компьютерные технологии. 2016.С. 182-185.
38. Бондаренко І.М. Системи радіозв'язку. Кн.2, ч.2. Мережі радіозв'язку: Навч. посібник. - Харків: ХІ ВПС. - 2003. – 144 с.
39. Бондаренко І.М., Глушко А.П., Меньков О.М. Коди та кодування: Навч. посібник: - Харків: ХІ ВПС. - 2003. – 116 с.
40. Бондаренко І.М., Глухов О.В., Кравчук О.О. Електронні системи: Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ. – 2019. – 240 с.
41. Бондаренко І.М., Бородин О.В., Карнаушенко В.П. Мікропроцесорні системи контролю та керування: Навч. посібник. - Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 244 с.