МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

КОЗАЧЕНКО ДМИТРО ВИКТОРОВИЧ

Допускається до захисту:
Завідувач кафедри
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент
_____Т. В. Нескородєва
«__»_____20__р.

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ ЗАХИЩЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ З КВАДРОКОПТЕРАМИ В УМОВАХ АКТИВНОЇ ПРОТИДІЇ

Спеціальність 125 Кібербезпека

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Керівник:
Сергієнко С.П., доцент кафедри
інформаційних технологій,
к.ф.- м.н., доцент

_____
(підпис)

Оцінка : _____ / _____ / _____
(бали за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця 2021

АНОТАЦІЯ

П.І.Б Розробка концепції оптичного каналу захищеного зв'язку з квадрокоптерами в умовах активної протидії

Спеціальність_____, спеціалізація _____, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2021.

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі досліджено особливості виявлення та розпізнавання малих безпілотних літальних апаратів; дослідження моделі та радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА; радіоелектронне придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА. Визначено використання безпілотних літальних апаратів, типи БПЛА, канали виявлення БПЛА, виявлення та розпізнавання БПЛА широкого застосування, огляд існуючих методів виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів на основі аналізу електромагнітного спектра. Досліджено модель комплексного застосування заходів для виявлення МБЛА, проблемні питання радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, особливості радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, заснованої на прийомі сигналів СРНС, проблемні питання радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, БПЛА, БЛА, протидія безпілотним літальним апаратам, придушення безпілотного літального апарату, радіоелектронне придушення, радіоелектронна боротьба, навігаційна система

70 с., 6 табл., 8рис., 40 джерел.

Табл. 6, Рис. 8, Бібліограф.: 40 найм.

ABSTRACT

Name Development of the concept of optical channel of secure communication with quadrocopters in the conditions of active counteraction

Specialty _____, specialization _____, Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2021.

In qualification (bachelor's) the peculiarities of detection and recognition of small unmanned aerial vehicles are investigated in the work; study of the model and electronic suppression of the UAV navigation system; electronic suppression of radio control lines and UAV data transmission. The use of unmanned aerial vehicles, types of UAVs, UAV detection channels, detection and recognition of UAVs of wide application, review of existing methods of detection of small unmanned aerial vehicles based on electromagnetic spectrum analysis are determined. The model of complex application of measures for UAV detection, problematic issues of electronic suppression of UAV navigation system, features of electronic suppression of UAV navigation system based on reception of SRNS signals.

Key words: unmanned aerial vehicle, UAV, UAV, counteraction to unmanned aerial vehicles, suppression of unmanned aerial vehicle, electronic suppression.

70 pp., 6 tables, 8 figures, 40 sources.

Table. 6, Fig. 8, Bibliographer .: 40 hired.

ЗМІСТ

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1.ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ **9**

1.1 Використання безпілотних літальних апаратів 9

1.2. Типи БПЛА 12

1.3. Канали виявлення БПЛА 14

1.4. Виявлення та розпізнавання БПЛА широкого застосування 16

1.4.1. Джерела акустичних сигналів БПЛА 16

1.4.2 Інформаційні характеристики акустичних сигналів БПЛА 18

1.5. Огляд існуючих методів виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів на основі аналізу електромагнітного спектра 20

РОЗДІЛ 2.ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА **24**

2.1 Модель комплексного застосування заходів для виявлення МБЛА 24

2.2 Проблемні питання радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА 27

2.3. Особливості радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, заснованої на прийомі сигналів СРНС 30

2.4 Особливості радіоелектронного придушення інтегрованої навігаційної системи БПЛА, заснованої на комплексуванні даних мікромеханічних інерціальних систем і сигналів СРНС 35

2.5. Можливості акустичного придушення автономної навігаційної системи БПЛА, заснованої на мікромеханічних інерціальних системах 39

РОЗДІЛ 3.РАДІОЕЛЕКТРОННЕ ПРИДУШЕННЯ РАДІОЛІНІЙ УПРАВЛІННЯ І ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ БПЛА **41**

3.1. Проблемні питання радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА 41

3.2. Особливості організації зв'язку в командній радіолінії управління БПЛА . 45

3.2.1. Спеціальні та військові БПЛА 45

3.2.2. Комерційні БПЛА 48
3.3. Особливості радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА 51
3.4 Особливості інформаційно-технічного впливу з метою втручання в процес функціонування систем БПЛА або перехоплення управління 60
ВИСНОВКИ 65
СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ 67

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час кількість сфер застосування малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стрімко зростає. Серед порівняно нових споживчих ринків БПЛА можна відзначити лісове, сільське і дорожнє господарство, енергетику та зв'язок, видобуток і транспортування нафти і газу, безпеку і охорону навколишнього середовища і т.д. Багато малих БПЛА стали доступними для звичайних користувачів, причому їх оснащення досить складне і включає фото- і відеокамери, систему автопілота і навігації, що робить управління такими БПЛА досить простим.

Вирішуючи ці завдання, вони дозволяють економити великі матеріальні, енергетичні і людські ресурси. БПЛА істотно скорочують час вирішення таких завдань, в ряді випадків дозволяють зберегти людські життя, зменшити шкоду від стихійних лих і надзвичайних ситуацій, яких останнім час стає все більше [1, 2].

Повсюдне використання малих БПЛА крім, безсумнівно, позитивних сторін породило ряд проблем, пов'язаних з неадекватною поведінкою деяких власників БПЛА, несанкціонованим моніторингом об'єктів і територій державної ваги, випадками вторгнення в особисте життя і т.д. У ряді перерахованих випадків актуальною стає задача виявлення БПЛА в повітрі [2].

БПЛАЗ появою середніх і малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завдання протидії їх застосування в особливо контрольованих зонах істотно актуалізувалися. Починаючи з середини 2000-х років в засобах масової інформації стали регулярно з'являтися повідомлення про небезпечний використанні малих БПЛА в районах аеропортів, а з середини 2010-х - про застосуванні малих БПЛА для ведення несанкціонованого спостереження { важливих об'єктів, проведення терактів і диверсій, транспортування заборонених вантажів (зброї, наркотиків), і широке використання БПЛА в військовій справі. У зв'язку з цим на Заході почалася активна наукова розробка даного напрямку досліджень, про що можна судити по роботах [1-9].

При цьому дана проблематика є відносно новою, так як найраніше з робіт по тематиці протидії БПЛА відноситься до 2008 року, а початок активних наукових публікацій з цієї тематики відноситься до 2016-2017 рр. В результаті до 2020 року в Західній науковій пресі були введені щодо усталені терміни, а також визначені основні напрямки досліджень в цієї предметної області: «протидія БПЛА» - використовуються такі терміни як «C-UAV», «CUAV», «CUAVs», «CUAVs» (Counter Unmanned Aerial Vehicles); «Системи протидії БПЛА» - використовуються такі терміни як «CUAS», «CUAS» (Counter Unmanned Aircraft Systems), «CUAV system», «CUAV-system», «AUDS» (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems; «Технології протидії БПЛА» - використовуються такі терміни як «Anti-Drone Technologies» і «Counter-UAVs Technologies».

При цьому, якщо на початковому етапі появи завдання протидії БПЛА (на початку 2000-х рр.), це завдання вирішувалося виключно засобами поразки зенітно-ракетних комплексів (ЗРК) протиповітряної оборони (ППО), то в даний час фахівці усвідомили, що пряме відображення масованого нальоту БПЛА засобами ЗРК ППО, по-перше, невиправдано економічно через використання дорогих ракет по великому числу відносно дешевих БПЛА, а по-друге, це веде до швидкого вичерпання бойового ресурсу ЗРК і подальшої їх нездатності відобразити удар вже пілотованої авіації, а також крилатих ракет високоточної зброї (ВТО). У зв'язку з цим, в даний час широко досліджуються додаткові способи протидії БПЛА, в тому числі такі як застосування засобів радіоелектронного придушення (РЕП), а також засобів спрямованого випромінювання енергії - лазерної зброї.

При цьому, якщо застосування лазерної зброї є ще відносно експериментальною технологією, то способи протидії БПЛА на основі спільного використання комплексів РЕП і ЗРК вже активно використовуються в практиці локальних бойових дій.

Об'єктом дослідження є оптичний канал захищеного зв'язку з квадрокоптерами

Предметом дослідження є розробка концепції оптичного каналу захищеного зв'язку з квадрокоптерами в умовах активної протидії

Метою роботи є здійснення розробки концепції оптичного каналу захищеного зв'язку з квадрокоптерами в умовах активної протидії.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні *завдання*:

- дослідити використання безпілотних літальних апаратів;
- проаналізувати типи та канали виявлення БПЛА;
- визначити виявлення та розпізнавання БПЛА широкого застосування;
- здійснити огляд існуючих методів виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів на основі аналізу електромагнітного спектра;
- проаналізувати модель комплексного застосування заходів для виявлення МБЛА;
- визначити проблемні питання радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА;
- дослідити особливості радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, заснованої на прийомі сигналів СРНС;
- проаналізувати особливості радіоелектронного придушення інтегрованої навігаційної системи БПЛА, заснованої на комплексуванні даних мікромеханічних інерціальних систем і сигналів СРНС;
- визначити можливості акустичного придушення автономної навігаційної системи БПЛА, заснованої на мікромеханічних інерціальних системах;
- визначити проблемні питання радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА;
- проаналізувати особливості організації зв'язку в командній радіолінії управління БПЛА;
- визначити особливості радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА;

- визначити особливості інформаційно-технічного впливу з метою втручання в процес функціонування систем БПЛА або перехоплення управління.

Практичне значення отриманих результатів. Важливими теоретичними результатами представляються розроблений метод збільшення зв'язності бездротових натільних мереж при використанні БПЛА, комплекс методів щодо захисту літаючих сенсорних мереж від навмисних електромагнітних впливів і новий метод збору інформації з сенсорних полів, що передбачає передачу відео зображення з БПЛА на основі використання протоколів великомасштабних маловикористованих мереж зв'язку на значні відстані, обчислюються кілометрами.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дипломній роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування, прикладної теорії надійності, теорії оптимізації та інші.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить 70сторінки, 8 рисунка, 6 таблиць, список літератури містить 40 найменувань літературних джерел.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1 Використання безпілотних літальних апаратів

Роботи, спрямовані на створення безпілотних літальних апаратів, почалися давно, ще в роки першої світової війни. У 1930-і роки з'явилися перші дистанційнопілотні повітряні мішені. А під час другої світової війни з'являється перший ударний безпілотний літак - німецький літак-снаряд Фау-1. Згодом ударні літаки-снаряди великої дальності відносили до крилатих ракет і не називали безпілотними літаками. В кінці 1950-х років з'являються безпілотні розвідники. 70-ми роками XX століття датуються науково-дослідні розробки і в області бойових (ударних) БПЛА, а також безпілотних літаків з великою висотою і тривалістю польоту, призначених для тривалого спостереження і використання у складі розвідувально-ударних комплексів.

У 1970-х - 1980-х роках цією тематикою займалися конструкторські бюро П.О. Сухого, А.Н. Туполєва, В.М. Мясищева, А.С. Яковлєва, Н.І. Камова. В КБ ім. А.Н. Туполєва створені безпілотні розвідники «Яструб», «Стриж», «Рейс», а також ударний «Коршун», створений спільно з НДІ «Кулон». У КБ ім. А.С. Яковлєва спроектований комплекс «Бджола».

БПЛА все більше знаходять широке застосування і в інших видах діяльності людства. Наприклад, в сільському господарстві БПЛА з GPS-навігацією використовуються для запилення рослин на полях. При цьому досягається значна економія хімікатів і більше ретельна обробка посівів у порівнянні з пілотованої авіацією. Вони використовуються для доставки медикаментів і гуманітарних вантажів у важкодоступні райони, можуть застосовуватися для перевірки ліній електропередачі трубопроводів. Дрон, інша назва.

БПЛА, можуть використовуватися і державною службою з надзвичайних ситуацій для моніторингу і прогнозування, а також при контролі небезпечних

об'єктів (безпека і охорона навколишнього середовища) і багато інших. Зокрема, в якості несучої платформи метеорологічних вимірювальних комплексів для дослідження атмосферного прикордонного шару (АПС) [3, 4] можуть використовуватися БПЛА мультикоптерного типу [5].

Вони мають переваги по відношенню до БПЛА літакового типу, які, в силу високої швидкості переміщення в атмосфері, не забезпечують достатнього просторового і тимчасового дозволу вимірювань, мають низьку чутливістю, не дозволяють досліджувати турбулентні процеси. В даний час доступні і відносно недорогі мультикоптери забезпечують підйом з корисним навантаженням 3 - 5 кг на висоту 2 - 4 км при тривалості польоту 30 - 40 хв.

В сучасних БПЛА бортова система навігації і управління може забезпечувати:

- політ по заданому маршруту (завдання маршруту проводиться з зазначенням координат і висоти поворотних пунктів маршруту);

- зміна маршрутного завдання або повернення в точку старту по команді з наземного пункту управління;

- обліт зазначеної точки;

- стабілізацію кутів орієнтації БПЛА, - підтримка заданих висот і швидкості польоту (шляховий або повітряної),

- збір і передачу телеметричної інформації та параметри польоту і роботі цільового обладнання, - програмне управління пристроями цільового обладнання.

Все це дозволяє забезпечити більшу мобільність і оперативність вимірів при невисокій вартості експлуатації БПЛА. Основні переваги технології вимірювань параметрів атмосферного прикордонного шару за допомогою БПЛА мультикоптерного типу:

- прямі контактні вимірювання метеорологічних і турбулентних характеристик АПС;

- можливість оперативних короткочасних вимірювань характеристик АПС в заданих точках атмосфери (на висотах від 0 до 4000 м);

- високу просторову роздільну і тимчасовий дозвіл;

- хороша перешкодозахищеність;

- можливість вимірювання вертикальних профілів метеорологічних, турбулентних і екологічних характеристик АПС за допомогою контрольованого підйому (спуску) БПЛА за заданою програмою;

- невеликі вага і габаритні розміри пристрою;

- відносно невисока ціна.

Основні недоліки технології вимірювань параметрів АПС за допомогою БПЛА мультикоптерного типу:

- невелика тривалість вимірювань (20 - 40 хв);

- відносно низька вантажопідйомність несучої платформи (потрібне створення спеціалізованих вимірювальних комплексів, мають малу вагу, невеликі габаритні розміри і низьке енергоспоживання).

Незалежно від сфери застосування, повномасштабне виконання місій БПЛА може включати такі під задачі як виявлення, локалізація і ідентифікація цілей, супровід і ціле вказування [6, 7]. Як свідчать різні джерела інформації, в даний час в нашій країні і за кордоном за результатами оцінки внеску різних технічних засобів в ефективність бойових дій угруповань збройних сил пріоритети віддані засобів отримання розвідувальної інформації. Повітряна розвідка по справедливості вважається однією з найнебезпечніших бойових завдань. Підлягають розвідці мети противна сторона прагне приховати і захищає їх потужною об'єктової та військової ППО.

Особливо небезпечна повітряна розвідка в початковий період бойових дій, коли ППО противника ще не пригнічена, а також при відсутності панування в повітрі. Тому особливої актуальності набуває використання комплексів на основі безпілотних літальних апаратів для повітряної розвідки [7]. У більшості перерахованих випадків актуальною стає задача виявлення БПЛА в повітрі.

1.2. Типи БПЛА

Відповідно до існуючої класифікації БПЛА по їх основними характеристиками, вони впораються на дві групи:

- малорозмірні безпілотні літальні апарати (МБЛА);

- БПЛА середніх і великих розмірів.

Боротьба з МБЛА являє собою комплекс заходів по їх виявленню, розпізнаванню, прицілюванню, захоплення і поразки. У зв'язку з малою помітністю МБЛА завдання з виявлення і розпізнавання цілі є найбільш складною і важливою.

До основних параметрів класифікації МБЛА відносяться:

- габаритні і вагові характеристики (довжина, розмах крила, злітна маса, маса корисного навантаження);

- оперативні характеристики (тривалість, дальність і висота польоту, максимальний радіус застосування);

- тип конструкції;

- тип рухової установки (електродвигун, двигун внутрішнього згоряння, турбореактивний двигун, реактивний двигун), а також тип рушія (пропелер, несучий гвинт, що несе крило);

- виконуються функціональні завдання (розвідувальні, розвідувально-ударні, радіоелектронної боротьби, транспортні);

- ступінь автономності (політ за фіксованою або колекційною програмою, дистанційно-пілотований політ) [1].

Сукупність цих ознак визначила класифікацію МБЛА:

- нано БЛА масою менше одного кілограма, тривалістю польоту менше однієї години і висотою польоту до 300 м;

- мікр про БЛА - масою до 10 кг, часом польоту близько однієї години і висотою польоту до 1 000 м;

- міні -БЛА - масою до 50 кг, часом польоту до декількох годин і висотою польоту до 3 000-5 000 м [1].

Проаналізувавши існуючі БПЛА, можна класифікувати їх за особливостями їх конструктивного виконання [2]. Мікро-БПЛА виконані в своїй

більшості за класичною аеродинамічною схемою, рідше зустрічається схема «літаюче крило». По розташуванню крила - високоплан.

Зустрічаються літаки, які мають поперечне V крила. Двигуни електричні, в основному тягнуть. Горизонтальне оперення - прямокутне, розташоване низько щодо вертикального. Дані БПЛА здійснюють зліт з руки, а посадку - на парашуті. Міні-БПЛА виконані за класичною аеродинамічною схемою. Крило розташоване високо. Фюзеляжі представлені у вигляді як гондоли, так і однофюзеляжних схем. Вертикальне оперення представлено однокільовим, двокілевим рознесеним, рідше зустрічається

V-подібне. Двигуни в основному поршневі, що штовхають або тягнуть. Зліт здійснюють з пускових установок, а посадку - на парашуті або по-літакового. Міді-БПЛА відрізняються від міні-БПЛА тільки тим, що здійснюють зліт і посадку по-літаковому, мають не вбирючі трьохпірні шасі з носовою опорою і поршневі двигуни. МаксіБПЛА виконані за класичною аеродинамічною схемою. Крило розташоване низько.

Оперення V-подібне. Двигуни штовхають і представлені як ТРД, ТВД, так і ПД. Шасі забирається. Зліт і посадку виконують по-літакового. «Безпілотники» розрізняються по масі (від апаратів масою півкілограма, порівнянні з авіамоделью, до 10-15-тонних гігантів), висоті і тривалості польоту.Безпілотні літальні апарати масою до 5 кг (клас «мікро») можуть злітати з будь-якої самої маленької майданчики і навіть з руки, піднімаються на висоту 1 - 2 км і знаходяться в повітрі не більше години. Як літаки-розвідники їх використовують, наприклад, для виявлення в лісі або в горах військової техніки терористів. «Безпілотники» класу «мікро» масою всього 300 - 500 г, образно кажучи, можуть зазирнути у вікно, тому їх зручно використовувати і в міських умовах. Слідом за «мікро» йдуть безпілотні літальні апарати класу «міні» масою до 150 кг. Вони працюють на висоті до 3 - 5 км, тривалість польоту становить 3 - 5 ч. Наступний клас - «міді». Це більш важкі багатоцільові апарати масою від 200 до 1000 кг. Висота польоту сягає 5 - 6 км, тривалість - 10 - 20 год. І, нарешті, «максі» - апарати масою від 1000 кг до 8 - 10 т. Їх стелю - 20 км, тривалість

польоту - понад 24 ч. Ймовірно, незабаром з'являться машини класу «супермаксі». Можна припустити, що їх маса перевищить 15 т. Такі «ваговози» нестимуть на борту величезну кількість апаратури різного призначення і зможуть виконувати найширший коло завдань.

1.3. Канали виявлення БПЛА

Інформація для виявлення і подальшого пеленгації БПЛА може бути отримана шляхом прийому спеціальними засобами відбитої і випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектру електромагнітних і акустичних хвиль. Будь-якому матеріальному об'єкту , в тому числі і БПЛА, притаманні демаскуючі ознаки, які виділяють його в навколишньому середовищі, роблячи його помітним для спостереження в даний час ступінь помітності визначають значенням його сигнатур в радіочастотному, інфрачервоному (ІК) і видимому діапазонах спектру, а також акустичної сигнатурою.

Сучасні легкі БПЛА мають сигнатури невеликого значення: їх виготовляють з використанням композитних матеріалів і пластика зі спеціальною забарвленням і особливою комбінацією шарів; невеликі бензинові або електричні двигуни випромінюють мало тепла і працюють майже безшумно [8]. Значна різноманітність можливих варіантів побудови і використання коштів спостереження в кожному з зазначених діапазонів обумовлює труднощі оцінювання їх ефективності.

Акустичний канал. Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонійними і широкосмуговими складовими. Він включає в себе гармонійні залишають випромінювання двигуна, шуму обертів гвинта, випромінювання механічної природи, а також високочастотну і низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними по частоті спектрами. В шумі силової установки БПЛА, має поршневий двигун повітряного охолодження, при відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун [8 - 13].

Оптичний канал. Оптичне виявлення БПЛА дуже залежить від чинників навколишнього середовища. Збільшення дальності виявлення досягається за рахунок звуження поля зору, зменшення зони огляду і збільшення часу пошуку. Тому візуальні сенсори є неефективними пристроями для проведення пошуку. При надходженні зовнішніх цілевказань від більш ефективного пошукового засобу оптичні сенсори можуть бути ефективно використані для супроводу БПЛА [8, 14]. Оскільки безпілотники є значно меншими за розмірами в порівнянні з пілотованими засобами, то це ускладнює їх виявлення за допомогою оптичних засобів. Порівняно з літаком контрастність БПЛА щодо фону є меншою через відсутність світлових маяків, зменшений факел малого двигуна і меншу поверхню відображення [14].

ІК канал. Тепло від БПЛА виділяється, в основному, силовою установкою і, в меншій мере, електронними компонентами, а також точками гальмування на несучих краях крил, пропелерів і гвинтів. Розробники безпілотників намагаються попередити випромінювання в ІК діапазоні в напрямку розміщених на землі приймачів і направити це випромінювання в сторону неба [8, 14 - 15]. Крім того, використовують матеріали з малою випромінювальною здатністю, такі як срібло і алюміній [16]. В даному випадку можливість БПЛА бути виявленим визначається його випромінювальною здатністю, контрастом і площею випромінювання.

Радіоканал. Пошук БПЛА за допомогою активних радіолокаційних станцій досить продуктивний, так як вони мають відносно великий імпульсний обсяг пошуку і значну дальність виявлення [17]. Однак РЛС можуть бути визначені противником по власному випромінюванню. Радіолокаційне виявлення БПЛА може бути прийнятним тільки тоді, коли не ставляться вимоги до скритності роботи або високої мобільності [15]. Як уже зазначалося, більшість БПЛА виготовляють з композитних матеріалів, які досить погано відображають електромагнітні хвилі. [15].

Канал радіорозвідки. БПЛА можуть бути виявленими і засобами радіотехнічної розвідки шляхом прийому і аналізу радіосигналів ліній зв'язку та

управління, радіолокаційних висотомірів, постановників активних перешкод і радіолокаційних станцій. Однак цим методом можна встановити лише напрямок на БПЛА, причому точність визначення підвищується при збільшенні часу спостереження. Деякі низькочастотні лінії зв'язку можуть бути виявлені на значних відстанях. Випромінювання бортових РЛС і постановка активних перешкод БПЛА можуть бути виявлені на ще більших відстанях. Цей метод вимагає мінімального обладнання та дозволяє швидко визначити пеленг цілі при подальшої видачі цілевказівок на кошти оптичного або ІК спостереження.

В роботі [18] описана комплексна сенсорна мережа виявлення БПЛА, що містить радіолокаційний, акустичний і телевізійний канали. Однак запропонований алгоритм роботи системи не враховує ефективності каналів виявлення з урахуванням різних фізичних ознак безпілотників. Результати дослідження по розробці методу виявлення БПЛА на основі аналізу їх сигнатур в акустичному і радіолокаційному діапазонах хвиль представлені в роботі [19]. Інші види та мережі виявлення описані в роботах [20 - 24].

Оцінюючи переваги і недоліки розглянутих фізичних каналів виявлення БПЛА, можна зробити висновок, що для виявлення малорозмірних і мало швидких безпілотників (мікро-БПЛА), так званих БПЛА широкого застосування, що є найбільш затребуваними в рішенні цивільних і військових завдань, оптимальним є акустичний канал.

1.4. Виявлення та розпізнавання БПЛА широкого застосування

1.4.1. Джерела акустичних сигналів БПЛА

Основними джерелами шуму мікро-БПЛА є двигун, повітряний гвинт і планер. Оскільки швидкості польоту таких БПЛА дозвукові, то аеродинамічним шумом планера можна знехтувати через його невеликій значимості. Джерелами шуму в поршневому двигуні є процеси впуску свіжого заряду (шум впускання), горіння, випуску відпрацьованих газів (шум випуску); механічне переміщення

деталей, яке супроводжується ударами і тертям в зчленуваннях і стиках. Останні спільно з процесом горіння є джерелами корпусного шуму. Акустичний шум зазвичай збільшується в міру збільшення потужності двигуна [2 - 25].

Електричні двигуни мають більш низькі шумові характеристики, однак їх використання обмежується БПЛА малим радіусом дії. Двигуни більшості не реактивних БПЛА є досить невеликими для використання глушників і зниження таким чином акустичної помітності. Крім того, природний і антропогенний шум навколишнього середовища ускладнює виявлення БПЛА по їх акустичному портрету. Але оскільки безпілотники цього класу мають малі ІК і радіолокаційні сигнатури, в порівнянні з пілотованої авіацією, то використання акустичних каналів для їх виявлення стає вельми актуальним.

Акустичні сенсори дозволяють наземним засобам виробляти пошук і виявлення БПЛА в пасивному режимі, знижуючи таким чином вірогідність визначення противником власних позицій. Тому модифікація існуючих акустичних систем пошуку або створення нових може забезпечити надійний метод виявлення БПЛА [16].

Для детального аналізу акустичних сигналів використовують решітки мікрофонів, оскільки використання окремого мікрофона дасть лише грубу оцінку акустичного сигналу [10]. Акустичні антенні решітки можуть ефективно використовуватися для виявлення і супроводу низько літаючих БПЛА на тактичних відстанях. У той же час акустична решітка, крім просторового накопичення сигналів, дозволяє оцінювати час приходу фронту акустичної хвилі в різні точки простору, що, в свою чергу, сприяє оцінці кута поширення хвилі відносно решітки, т. е. можна обчислити пеленг на джерело випромінювання. Для БПЛА середнього розміру з двигуном внутрішнього згоряння дальність виявлення в п'ять разів перевищує цей же показник для безпілотника з електричним двигуном [1, 2, 11, 12].

Характеристики спрямованості - одна з найважливіших характеристик джерел шуму в авіації. Фактори спрямованості випромінювання різних джерел використовуються в класичних підходах авіаційної акустики для розрахунку

очікуваних рівнів шуму літаків на місцевості. Ці методи розрахунку також входять в методику прогнозу кордонів чутності і помітності малорозмірних безпілотних літальних апаратів з гвинтокриловою установкою. В роботі [26] наведені результати акустичних випробувань малорозмірного БПЛА з поршневим двигуном в заглушеній камері АК-2 ЦАГІ.

Показано, що при роботі силової установки на злітному режимі в задній півсфері в напрямках 105 - 1200 в сумарному шумі силової установки домінує випромінювання на частоті першої гармоніки шуму обертання гвинта. На осі колінчастого вала домінуючим є акустичне випромінювання від поршневого двигуна. Тут же описані чинники спрямованості сумарного акустичного випромінювання силової установки і окремих його частин.

1.4.2 Інформаційні характеристики акустичних сигналів БПЛА

При гармонійному виявленні аналізуються вузькі смуги частот на коротких тимчасових інтервалах. Сигнал подають у вигляді суми гармонік з невідомими частотами і фазами. Якщо сигнали слабкі, то гармонійний детектор працює більш надійно ніж енергетичний [13, 14, 24].

Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонійними і широкосмуговими складовими. Він включає в себе гармонійні складові випромінювання від двигуна, шуму обертання гвинта, випромінювання механічного походження, а також високочастотну і низькочастотну складові шуму двигуна з безперервними по частоті спектрами. В шумі силової установки БПЛА, що включає поршневий двигун повітряного охолодження, при відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Дискретні складові слідують з частотами $f_i = f_0 \times i$, які кратні частоті запалювання f_0, де i = 1, 2, 3 ... - номер відповідної гармонійної складової. На високих частотах значимість періодичних процесів у формуванні спектра акустичного випромінювання двигуна помітно послаблюється, оскільки більш

важливу роль в сумарному акустичному випромінюванні починають грати процеси випадкового походження. Зокрема, для шуму вихлопу може бути істотною вихрова складова. Насправді ж вихлопної тракт двигуна формує в атмосфері послідовність імпульсів тиску, частотний спектр якого представлений на рис. 1.1 [5, 27].

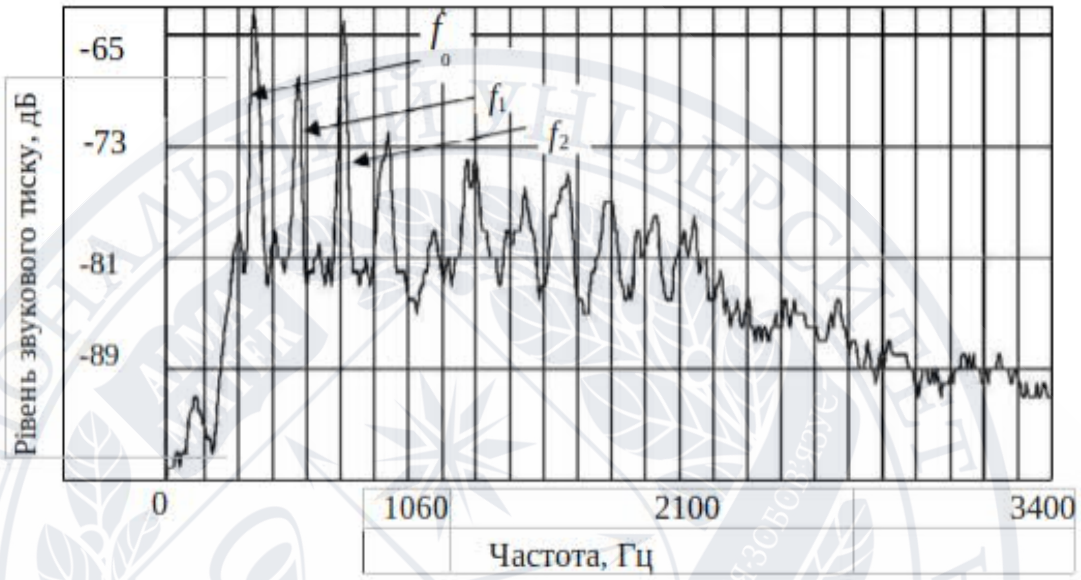

Рис. 1.1Типовий спектр акустичного випромінювання роботи силової установки БПЛА

Інший інформаційної характеристикою акустичних сигналів БПЛА, який використовується для їх розпізнавання, є фазовий портрет цих сигналів [28].

Геометричну дальність виявлення акустичних сигналів визначають зоною акустичної освітленості, отриманої в результаті побудови променевої картини, яка залежить від стратифікації атмосфери, рельєфу підстильної поверхні, висоти джерела звуку і характеристик його спрямованості.

1.5. Огляд існуючих методів виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів на основі аналізу електромагнітного спектра

Більш ретельне дослідження різних інформаційних характеристик акустичних сигналів, малопомітних БПЛА двох видів проведено в роботах [29 -

32]. Експериментальна установка для досліджень складалася з вимірювального конденсаторного мікрофона Superlux ECM-999, встановленого у фокусі параболічного відбивача діаметром 0,6 м.

Вихід мікрофона підключався по симетричному Аудіоінтерфейс XLR до входу зовнішньої звукової карти Behringer U- Phoria UM2. Звуковий сигнал оцифровується з частотою дискретизації 48 кГц і розрядністю 24 біта. Експерименти проводилися в умовах міста, у внутрішньому дворі університету. Відношення сигнал / шум в оброблюваних записах склало близько 20 дБ. Досліджено акустичні випромінювання квадрокоптера DJI Phantom 2 і моноплана Skywalker Falcon 1340 mm EPO Flying Wing. За результатами обробки записів отримані спектри використовуваних БПЛА, їх спектрограми і нормовані автокореляційні функції, а також фазові портрети.

Аналіз отриманих інформаційних характеристик дозволив зробити такі висновки:

- експериментальне дослідження звукових сигналів квадрокоптера і моноплана показало, що їх спектри мають яскраво виражені гармонійні складові з частотами, кратними частоті обертання гвинта;

- гармонійні складові звукового сигналу квадрокоптера ширше, ніж у моноплана, що пояснюється деяким розходженням режимів роботи двигунів в процесі польоту або при роботі системи компенсації вітрових збурень;

- при великому розходженні режимів двигунів квадрокоптера спектральні максимуми поділяються на кілька, що може бути одним з ознак для класифікації БПЛА;

- в звукових сигналах досліджених БПЛА, при наявності накопичення спектрів, впевнено спостерігаються гармоніки з частотами до 8 - 10 кГц ;

- при акустичному спостереженні БПЛА літакового типу під малими кутами до напрямку руху структура спектра змінюється незначно, що дає можливість застосовувати в ремінне накопичення на тривалих інтервалах.

Для побудови первинних ознак звукового образу БПЛА прийняті пасивним содар звукові коливання БПЛА перетворюються в електричний сигнал, який

представляє собою реалізацію широкосмугового випадкового процесу, опис якого може бути дано енергетичним спектром. Тому інформаційними ознаками звукового образу БПЛА можуть служити оцінки спектральних коефіцієнтів, що визначаються за дискретної реалізації, що містить задану кількість відліків.

Перехід до вторинних інформаційних ознаками здійснюється шляхом побудови коваріаційної матриці спектральних коефіцієнтів і її діаголізації. Після проведених розрахунків набір ознак, що надійшов на вхід системи, відповідає деякому класу, якщо середнє значення коефіцієнта подібності по всіх парах звіряються векторів більше певної порогової величини. Проведені теоретичні дослідження дозволяють розробити модуль формування колекції звукових образів БПЛА і модуль, який реалізує правило прийняття рішень.

Сучасні легкі безпілотники мають сигнатури невеликої величини: МБЛА роблять з композитних матеріалів і пластика зі спеціальною забарвленням і з особливою комбінацією шарів, їх невеликі бензинові і тим більше електричні двигуни мало випромінюють тепла і працюють майже бесшумно1. Тому, для ефективного виконання завдання необхідно одночасне використання декількох способів виявлення.

Найбільшу вразливість МБЛА обумовлює наявність у них електромагнітного випромінювання. До ЕМ протидійних ознак належать:

- сигнали бортового відповідача;
- сигнали радіолокаційних станцій, відбиті від корпусу і агрегатів МБЛА;
- сигнали телевізійних ретрансляторів, широкомовних станцій, базових станцій стільникового зв'язку, відбиті від МБЛА;
- команди і «доповіді» каналу управління між наземним пунктом управління і МБЛА, а також між МБЛА і супутником-ретранслятором системи навігації ;
- сигнали бортовий РЛС бокового огляду;
- канали обміну розвідувальною інформацією;
- сигнали системи автоматичної посадки на аеродром [1].

Основними способами виявлення МБЛА в електромагнітному спектрі є:

– використання тепловізора інфрачервоного діапазону ЕМ хвиль;

– використання камер оптичного діапазону ЕМ хвиль;

– використання радіолокаційних станцій;

– здійснення радіомоніторингу.

Для виявлення об'єктів з відмінною від навколишнього середовища температурою використовуються інфрачервоні тепловізійні камери, що дозволяє вести спостереження за допомогою за МБЛА навіть в умовах обмеженої видимості і в темний час доби. Для отримання найбільш інформативних і стабільних результатів можливо точне сполучення тепловізійних знімків з видимим зображенням. Для цього застосовується тепловізор і фотокамера для одночасного ведення аерофотозйомки у видимому діапазоні.

Для виявлення МБЛА в оптичному діапазоні ЕМ хвиль існує активні і пасивні методи. Активними методами вважається метод анагліфів і метод визначення координат МБЛА в просторі. Пасивні методи включають в свій склад метод візуального спостереження і метод комбінованого стереоефекту [2].

Основним засобом виявлення БПЛА є радіолокаційні станції. У ряді випадків МБЛА є складною метою для існуючих РЛС. Ці апарати мають малу ефективну площу розсіювання (ЕПР), через чого їх виявлення стає досить складним завданням. Зокрема, знижується максимальна дальність виявлення [3].

Розрахункові дальності виявлення МБЛА радіолокаційними станціями, при різних значеннях ЕПР БЛА, складають:

– РЛС метрового діапазону - 8-14 км для БЛА з ЕПР близько 0,1 м2 і 0,1 - 1,5 км для БЛА з ЕПР, що дорівнює 0,01 м2;

– 0 РЛС дециметрового діапазону - 9-16 км (ЕПР = 0,1 м2) і 0,8-2,0 км (ЕПР = 0,01 м2);

– РЛС сантиметрового діапазону - 12-25 км і 1,4-2,8 км [1].

З огляду на установку на них антирадарна покриттів, найбільшу ефективність дає застосування двухчастную імпульсних радіолокаторів. Перша

група частот в дециметровому діапазоні, друга в сантиметровому для виявлення МБЛА [2].

Радіомоніторинг є отримання інформації з використанням технічних засобів на ділянці її проходження по лініях радіозв'язку. В основному, включає в себе діяльність по вивченню радіообстановки, пошуку, виявлення і контролю різних каналів зв'язку, інших джерел радіовипромінювань.

Завданнями радіомоніторингу ефіру є:

– панорамний спектральний аналіз в реальному часі;

– пошук випромінювань від БПЛА, вимір їх параметрів, порівняння з базою даних для визначення їх приналежності;

– запис радіосигналів зі службовими параметрами (частота, час, рівень сигналу, спектрограма і т. д.) І подальше їх відтворення;

– технічний аналіз радіосигналів в реальному часі і при відкладеної обробки;

– пеленгація БПЛА [4].

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИДУШЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА

2.1 Модель комплексного застосування заходів для виявлення МБЛА

На ринку представлені як комплекси, що працюють на одному з методів виявлення, так і поєднують кілька методів, що є, урахуванням складності завдання виявлення МБЛА, найкращим рішенням. Найбільш ефективним рішенням є комбінування основних способів виявлення: використання

радіолокаційних засобів, обладнання радіомоніторингу, ІК і оптичних відеокамер. Даний варіант є дорогим, але кожен з методів доповнює інший, і, таким чином, зменшується кількість помилкових виявлень і збільшується загальна ефективність системи.

Алгоритм роботи наступний: радар виявляє БПЛА, паралельно з цим комплекс приймає сигнали, і шукає серед них підозрілі, далі відеокамери наводяться на передбачуваний об'єкт, і приймається рішення про передачу команди на придушення, перехоплення або знищення цілі.

Основна ідея даного комплексу технічних засобів полягає в децентралізованому розташуванні модулів, безперервно обмінюються один з одним по зашифрованим і перешкодостійкий каналах зв'язку службової інформацією, що сприяє підвищенню ефективності та складності виведення з ладу або фізичного знищення даних модулів. Завдяки тому, що комплекс складається з блоків, можливе створення необхідної конфігурацій для специфіки виконання конкретного завдання. Також, комплекс повинен володіти стійкістю до сторонніх електромагнітних впливів і підсистемою активної протидії загрозам, що полягає в здатності до самостійного прийняття рішення про заходи у відповідь або передач команд на забезпечення допомоги і підтримки.

Для контролю за рішеннями, прийнятими комплексом виявлення БПЛА, і завдання необхідних параметрів бере участь оператор. Завданням модуля радіолокаційних засобів є безпомилкове виявлення БПЛА на максимально великій відстані в умовах зі складною радіолокаційної обстановкою і зібрати інформацію, необхідну для проведення аналізу, до якої відноситься швидкість БПЛА, дальність до нього, а також розпізнавання типу об'єкта. Загальна ефективність системи залежить як від індивідуальних характеристик передавача, антени, приймача, злагодженої роботи між ними, так і від методу радіолокації.

З огляду на специфіку поставленого завдання, яку необхідно вирішити, необхідно знайти компроміс між потужністю передавача і діапазону хвиль, розмірами антени і діаграми її спрямованості, здібностях приймача обробити інформацію, що надходить

інформацію і вибору відповідного методу радіолокації, такого як частотний , фазовий і імпульсний. Завдяки оптимальній комбінації матеріально-технічної ресурсів можливе виявлення БПЛА на великих дистанціях, а також можливість розпізнавати дрони зі слабко виражені розвідними ознаками (такі автономно польотного завдання або працюють на нетипових радіочастотах).

Модуль з засобами радіомоніторингу виконує завдання виявлення передавачів, встановлених на БПЛА, визначення їх типу, основних характеристик і збору інформації для здійснення перехоплення управління. Основними і визначальними факторами ефективності функціонування системи є характеристики радіоприймального пристрою і антени, а також вибір методу радіомоніторингу - пошукового або безпошукове. Пошуковий спосіб полягає в пошуку інформативного сигналу в заданій смузі частот, який поділяється на повільний пошук, середній і швидкий.

При без пошуковому способі пошук ведеться на широкому діапазоні частот, що підрозділяється на інтерференційний, з використанням одно канальних і багатоканальних приймачів. Кожен із способів пошуку має свої переваги і недоліки, і вибір залежить від специфіки розв'язуваної задачі. Радіоприймальний пристрій повинен бути обладнаний декодерами, демодуляторами і засобами для проведення автоматичного і ручного технічного аналізу прийнятих сигналів.

Однією з можливостей поліпшення системи є створення МБЛА розвідника, забезпеченого комплексом розвідувальних засобів ЕМ спектру, здатних, за потребою, підлетіти ближче до можливої (спірною) цілі, і повідомити інформацію в головний вузол безпосередньо або через допоміжні вузли приймально-передавальних автономних антен.

Центральним вузлом функціонування інтегрованого комплексу, на який безперервно в автоматичному режимі приходить вся оброблена інформація від модулів, є комп'ютер в захищеному виконанні з встановленим на нього спеціальним програмним забезпеченням, здатним приймати рішення в автоматичному режимі.

З рішень це можуть бути наступні варіанти:

– передача команди про задіювання засобів ІК і оптичних камер для підтвердження виявлення мети;

– передача команди на уточнення інформації, що надійшла іншому комплексу, що працює в складі системи виявлення БПЛА;

– передача команди БПЛА, що входить в комплекс системи виявлення БПЛА, для підльоту до передбачуваного місця знаходження для прийняття рішення про факт виявлення;

– передача команди на придушення , перехоплення або знищення цілі засобів, що входять до складу системи придушення і знищення БПЛА;

– інформування оператора комплексу протидії БПЛА про факт виявленні БПЛА або помилкової тривоги.

Однією з можливостей до поліпшення системи є рознесення невеликих приймають і передають автономних антен на великій площі. Передаючи інформацію на центральний пункт обробки інформації, і зіставляючи з даними головного вузла, приймається рішення про подальші діях. При необхідності, дані антени можуть передавати інформацію на кілька центральних пунктів обробки, створюючи, таким чином, мережа виявлення МБЛА, площа дії якої може досягати сотень або тисяч квадратних кілометрів.

2.2 Проблемні питання радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА

При розгляді питань придушення каналу навігації БПЛА необхідно враховувати, що навігаційна система БПЛА може мати різний рівень складності і враховувати для визначення місця розташування БПЛА не скільки сигналів, що надходять від датчиків різної фізичної природи:

1) навігаційна система, заснована тільки на апаратурі споживачів АП) найбільш поширених СРНС - така система характерна для найпростіших малих БПЛА-квадрокоптера;

2) проста інтегрована навігаційна система, на основі комплексування даних мікромеханічних інерціальних навігаційних систем (ІНС) і АП СРНС - така навігаційна система характерна для широкого класу малих БПЛА-квадрокоптера для професійного використання в різних цілях;

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

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

Говорячи про придушення каналу навігації БПЛА, необхідно чітко поні мати, що сам факт радіоелектронного впливу (придушення або нав’язування неправдивих режимів роботи) відноситься тільки до сигналів, що приймаються АП від одного або декількох СРНС, що відповідають тільки одному каналу зі всієї безлічі каналів надходження даних в навігаційну систему БПЛА.

Таким чином з використанням РЕП можливо забезпечити значуще порушення роботи тільки найбільш простих навігаційних систем БПЛА (типи 1-3 зі списку). Для БПЛА з повноцінною інтегрованої навігаційної системою (тип 4 зі списку), заснованої на використанні декількох каналів отримання навігаційних даних, порушення супутникового каналу (в тому числі і

надходження по ньому неправдивих навігаційних даних, суперечить в даними інших каналів), в більшості випадків буде обнаружено але, після чого навігаційна система перестане використовувати супутниковий канал для визначення місця розташування БПЛА. Відзначимо, що в середніх і тяжких БПЛА, в переважній кількості випадків, в якості основного каналу формування навігаційних даних використовується інформація саме від авіаційних ІНС на основі лазерних або волоконно-оптичних гіроскопів.

Подрібно ТТХ таких ІНС розглянуті в роботі [33]. Дані ІНС в середньому забезпечують помилку числення шляху порядку 1,85 км за 1 год польоту. При цьому інформація по іншим каналам (дані від АП СРНС, дані висотомірів, сигнали РСБН і АЗН-В) є вторинною і після верифікації та комплек- сіроване вона використовуються тільки для корекції показань ІНС [34, 35]. Додатково зазначимо, що середні і великі БПЛА використовуються для рішення спеціальних і військових завдань, при цьому в них АП СРСН використовує не «відкриті», а «закритий» сигнали СРНС, що мають більш високу захищеність і крипто захист.

При цьому обладнання навігаційних супутників може формувати окремі перешкодозахищеність 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 важкою, фактично неможливою.

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

До таких напрямків удосконалення відносяться наступні:

1) використання для підвищення точності навігації локальних РСБН або систем - імітаторів сигналів СРНС [35, 38], при цьому станції цих систем можуть бути мобільними, перебуваючи на автомобілях, і завчасно розгортатися в зоні планованого застосування БПЛА. Зокрема, використання подібних систем

дозволяє підвищити відношення сигнал / шум (ЗСШ) на 35-50 дБ в зоні потиску (або поганого прийому) сигналів СРНС і забезпечити прийом навігаційних сигналів при потужностях активних шумових (відводять за швидкістю) перешкод в зоні дії РСБН до 100 Вт;

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

3) використання для навігації різних автономних систем техніч ського зору, а також технології SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) - технології автоматичного одночасного побудови карти місцевості в невідомому просторі, контролю поточного місцезнаходження БПЛА і пройденого шляху;

4) автономний прямолінійний політ БПЛА в напрямку мети, підсвічується зовнішнім джерелом випромінювання.

Таким чином, узагальнюючи вищесказане, можна зробити висновок, щопро застосування засобів РЕП, в тому числі і шляхом формування «інтелектуальних» перешкод, прицільних за частотою і структурі сигналів СРНС, з метою нав'язування помилкового визначення місцезнаходження і траєкторії польоту, орієнтоване на малі БПЛА з найпростішими навігаційними системами. При цьому високий темп розвитку БПЛА, а також можливість розробки в самому найближчому майбутньому навігаційних систем на основі електронних карт місцевості або систем технічного зору, зробить придушення каналів СРСН марним навіть проти малих БПЛА.

Далі розглянемо особливості придушення каналів навігації в БПЛА з навігаційними системами на основі тільки АП СРСН, а також з простими інерційних системах на основі комплексування даних мікромеханічних ІНС і сигналів СРНС, так як саме для таких БПЛА придушення каналу супутникової навігації може дати якийсь значущий ефект.

2.3. Особливості радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, заснованої на прийомі сигналів СРНС

Систему навігації на переважній кількості малих БПЛА становить АП, приймаюча сигнали однієї або декількох СРНС. До найбільш поширених СРНС відносяться системи: ГЛОНАСС (Росія), GPS / NAVSTAR (США), Beidou (Китай), Galileo (ЄС). Сигнали СРНС формуються на літерних частотах в діапазоні 1,1-1,6 ГГц. Як правило, прості навігаційні системи, що встановлюються на малі БПЛА, використовують інтегрований режим обробки сигналів від декількох СРНС, що забезпечує точність навігації 1-2,5 м як в горизонтальній площині, так і по висоті.

Теоретичні оцінки завадостійкості сигналів СРНС і режимів їх інтегрованої обробки в АП розглянуті в роботах.

]. Експериментальні оцінки завадостійкості сигналів СРНС і рівня перешкод, при якому навігаційні пристрої зберігають прийнятну ефективність функціонування, розглянуті в роботах [19]. Узагальнюючи матеріал вищевказаних робіт можна зробити наступні висновки.

1) Серед перешкод, які використовуються для придушення каналів СРНС в найбільш широкої ступеня застосовуються [25]:

- шумова перешкода (білий шум високої потужності на частотах каналів СРНС);

- гармонійна (Полігармонічні) перешкода (одночастотні або модульоване гармонійнеколивання на частоті (на частотах) корисного сигналу);

- прицільна імітує перешкода (перешкода імітує структуру сигналів СРНС з частотним і тимчасовим неузгодженістю, а також з фіксованим значенням фази обвідної маніпулює функції);

- стежить імітує перешкода (перешкода імітує структуру сигналів СРНС, але зі змінною початковою фазою маніпулює функції, закон зміни якої відповідає зміні відстані від приймача до станції РЕП);

- загороджувальна імітує перешкода (імітує набір сигналів супутників СРНС з однаковим частотним неузгодженістю для всіх компонентів і різних часових неузгодженістю для кожного компонента).

для організації імітують перешкод потребується розвідка як несучою частоти і фази, але і амплітуди сигналів СРНС, а також маніпулюють функцій, що представляють собою кодову послідовність для поділу сигналів і навігаційних даних. При цьому для формування стежить і прицільної імітують перешкод необхідна розвідка частотних, фазових і тимчасових параметрів корисних сигналів СРНС. Простіший в реалізації є загороджувальна імітує перешкода, оскільки вона не вимагає для формування точних часових параметрів сигналу [15].

2) Найбільш ефективними перешкодами для порушення нормального функціонування АП СРНС є імітують перешкоди, які відтворюють структуру реального сигналу СРНС з частотними, фазовими і тимчасовими па- параметром, що дозволяють нав'язати АП СРНС помилковий режим роботи і як наслідок - помилкове місцезнаходження БПЛА. Модифікація значущих параметрів імітує перешкоди дозволяє управляти траєкторією польоту БПЛА. При цьому значущі параметри перешкоди повинні бути якомога ближчими до відповідних параметрів реальних сигналів СРНС.

Постановка імітаційних перешкод проводиться в два етапи:

1) постановка шумової перешкоди, загороджувальної по каналах СРНС - визиває «відв'язування» АП від поточних сигналів СРНС, переривання режиму стеження і перехід в режим виявлення і пошуку сигналів;

2) формування імітує перешкоди з високим енергетичним потенціалом - викликає «прив'язку» АП СРНС до помилкових сигналів, з подальшим переходом в помилковий режим роботи.

Результати теоретичних досліджень завадостійкості АП СРНС GPS, представлені в роботі, узагальнені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Результати досліджень придушення каналів АП СРНС при використанні різних типів перешкод для ситуацій, коли АП функціонує автономно в штатному режимі [13]

Канал АП СРНС	Тип перешкоди	Імовірність успішного придушення каналу АП	Необхідний енергопотенціал станції РЕП,*Р*ППІ*G*ПП, дБВт

Канал виявлення	Шумова	0,5	8,5
	Гармонійна	0,5	8,5
	Загороджувальна імітує	0,67	–3,6…–9,5
Канал стеження за частотою	Шумова	0,32	19,5
	Гармонійна	0,32	24,4
Канал стеження за затримкою сигналу	Шумова	0,5	10,4
	Гармонійна	0,5	54
	Загороджувальна імітує	0,67	–3,6…–9,5
Квадратичний детектор	Шумова	0,1	18,7
	Гармонійна	0,1	18,7

Примітка: дальність між АП СРНС і станцією РЕП - 10 км

З наведених у таблиці 1 результатів слід, що з усіх розглянутих перешкод найменший енергетичний потенціал станції РЕП потрібно при постановці загороджувального імітує перешкоди. При впливі загороджувальної імітує перешкоди на канал виявлення і канал стеження за затримкою ймовірність придушення АП СРСН складе близько 0,9. При постановки шумовий або гармонійної перешкод з енергетичним потенціалом стан- ції РЕП, рівним 8,5 дбвт ймовірність придушення АП СРНС складе близько 0,5. З метою збільшення ймовірності придушення АП РЕП необхідно при постановці шумових перешкод мати енергетичний потенціал станції РЕП близько 20 дбвт, а при постановці гармонійних перешкод - близько 25 дбвт [33].

У роботах показано, що стійкість стандартних АП СРНС становить 34-36 дБ для динамічно рухомих АП і 38-40 дБ для слабо динамічних АП.

В роботі наведені оцінки рівня потужності навмисних перешкод, які можуть бути створені типовими засобами РЕП на вході прийомника АП СРНС авіаційного базування:

- при висоті польоту льотно-підйомного шляхом з АП СРНС 100 м:
- від наземних засобів РЕП: -78 ...- 166 дбвт;
- від авіаційних засобів РЕП: -82 ...- 103 дбвт;
- від тактичного БПЛА із засобами РЕП: -94 ...- 96 дбвт;

- від малогабаритного закидається передавача перешкод (ЗПП): 81 ...- 83 дбвт;

- при висоті польоту льотно-підйомного шляхом з АП СРНС 5 км:

- від наземних засобів РЕП: -81 ...- 102 дбвт;

- від авіаційних засобів РЕП: -82 ...- 103 дбвт;

о від тактичного БПЛА із засобами РЕП: -97 ...- 99 дбвт;

о від малогабаритного ЗПП: -101 ...-103 дбвт;

Проведені випробування АП СРНС вітчизняного виробництва «Грот-Н», «Бриз-КМІ», «МРК-32Р», «МРК-33» показали, що при реальній чутливості приймального пристрою -165 дбвт зрив супроводу настає при рівні перешкод на вході -120 дбвт, тобто перевищення перешкоди над сигналом становить приблизно 40-45 дБ. Це пояснюється застосуванням ШПС і їх накопиченням на інтервалі часу 1 мс. Результати цих експериментальних досліджень, в частині можливості виконання АП СРСН навігаційних завдань в режимах виявлення і стеження за сигналами СРСН в умовах шумових і гармонійних перешкод, за даними робіт [36], представлені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Значення ЗСШ на вході АП СРНС, при якому відсутнє рішення навігаційної завдання

Види перешкод	Режим работи АП СРСН	Значення ОСШ, дБ
Гармонічна	виявлення	–36…–46
	стеження	–57…–60
Шумова широкосмугова	виявлення	–41…–48
	стеження	–44…–49

Більш повна інформація про РЕП СРНС, а також про завадостійкості АП, представлена в роботах [35].

Для підвищення перешкодозахищеності АП СРНС в БПЛА можуть бути використані користані наступні способи і засоби [23]:

- використання віддалемірних кодів підвищеної точності, прибуваючих по «закритих» каналів СРНС;

- одночасний прийом і обробка в АП сигналів від різних СРНС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo і т. д.);

- просторова селекція сигналів СРНС;

- комплексування АП з ІНС;

- предкорреляціонна обробка суміші сигналів і перешкод;

- алгоритмічна посткорреляціонна обробка сигналів;

- поляризаційна селекція сигналів.

із зазначених способів, крім комплексування АП з ІНС (даний спосіб буде розглянуто далі), найбільшого поширення набув спосіб просторової селекції сигналів СРНС за рахунок установки на БПЛА фазирова антеною решітки (ФАР). Як показано в роботі [54], наявність на БПЛА всього лише 6 елементів в ФАР дозволяє досить ефективно формувати «нулі» діаграми спрямованості антени (ДНА) в напрямку на наземні джерела перешкод і «максимуми» ДНА ФАР - в напрямку на космічні апарати СРНС, тим самим забезпечуючи просторову режекцію перешкод.

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

Вище були розглянуті навігаційні системи найпростіших малих БПЛА, засновані на прийомі і обробці сигналів СРНС. На більш складних БПЛА встановлюються елементи автономної навігаційної системи - акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри і т.д. Загальноприйнятою нормою точності авіаційних інерційних ІНС «середньої точності» являється помилка числення шляху в 1,85 км за 1 год польоту. Така точність досягається авіаційними ІНС на основі лазерних або волоконно-оптичних гіроскопів. Однак маса таких ІНС складає від 8 кг, що робить проблематичним їх використання на малих і навіть на середніх БПЛА.

В результаті на малих БПЛА встановлюється простіша ІНС, оснащена мікромеханічними датчиками руху - акселерометрами і гіроскопами. Така ІНС, без її корекції за сигналами СРНС, не в змозі здійснювати автономне числення пройденого шляху через високих швидкостей дрейфу гироскопических датчиків. Накопичується помилка мікромеханічних ІНС, в умовах відсутності коригуючих сигналів СРНС, за 1 хв становить до 3 м по горизонталі і 2 м по вертикалі.

Таким чином, ці ІНС здатні без сигналів СРНС підтримувати прийнятну точність польоту на рівні 100-150 м протягом не більше 10 хв. При цьому, як правило, мається на увазі підтримку 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 числення шляху з прийнятною точністю потрібне використання сигналів СРНС [34]. Додатковими способами підвищення автономності та точності навігаційних систем БПЛА є установка барометра, радіо- або лазерного висотоміра. Приблизний діапазон вимірювань простого барометрического висотоміра для малих БПЛА до 9 км, точність 0,1 м. Діапазон вимірювань радіовисотомір до 700 м, точність по висоті 2-5%, точність по куту 0,25 ° [55]. Діапазон вимірювань лазерного висотоміра 0,1-120 м (статичні поверхні) і 2-40 м (рухомі поверхні), дозвіл 1 см, точність 0,1 м (об'єкт з 70% світло відображення при 20 ° С) [60]. Це обладнання дозволяє підвищити точність визначення координат за рахунок використання додаткових каналів надходження навігаційних даних, а також формувати профілі автономного польоту БПЛА за електронними картками місцевості містить барометричні дані або висотні профілі підстильної поверхні [35].

Особливості функціонування інтегрованих навігаційних систем БПЛА розглянуті в роботах. Стандартним режимом інтегрованої навігаційної системи БПЛА, є наступна ієрархія обробки навігаційних даних (у міру зниження значущості і пріоритету джерела навігаційних даних): «ІНС - СРНС - ОЕС - барометр - радіовисотомір». У разі утрудненого прийому сигналів СРНС навігаційна система БПЛА переходить в режим «ІНС - ОЕС - барометр -

радіовисотомір», причому в цьому випадку ОЕС може бути використано як для автономного контролю польоту по візуальним орієнтирам, так і для організації прямого дистанційного керування оператором по візуальним даними від ОЕС. При відсутності ОЕС на БПЛА навігаційна система переходить в режим «ІНС - барометр - радіо- висотомір», для польоту по барометричної і електронній карті місцевості.

При цьому, як наголошується в роботах в даний час спостерігається відхід від використання ОЕС для прямого управління БПЛА оператором, в напрямку автономного використання ОЕС, а також інших радіотехнічних засобів БПЛА, в режимі SLAM - режим автоматичного одночасного побудови карти місцевості в невідомому просторі і одночасного контролю поточного місцезнаходження БПЛА, а також числення пройденого шляху.

В роботі досліджується функціонування інтегрованих навігаційних систем в режимах «ІНС - СРНС» і «ІНС - СРНС - АЗН-в», де наземні опорні станції (НІС) АЗН-В формують своєрідну локальну РСБН. Показано, що в режимі «ІНС - СРНС» при повному сузір'ї навігаційних супутників (4-е і більше) забезпечується похибка визначення місцезнаходження БПЛА на рівні 6-8 м.У разі, коли кількість видимих навігаційних супутників знижується до 2-3, похибка квазілінійну зростає (рис. 1) при цьому ІНС здатна без сигналів СРНС підтримувати прийнятну точність польоту на рівні 30 м протягом не більше 2-4 хв, на рівні 60 м - протягом 4-6 хв [58].

У режимі «ІНС - СРНС - АЗН-в» інтегрована інерціальна система коректує показання ІНС як за сигналами СРНС, так і за сигналами наземних опорних станцій системи АЗН-в з точно відомими координатами. Використання подібного режиму дозволяє значно знизити похибка визначення місцезнаходження БПЛА. Так, при видимості 2 навігаційних супутників і 2 станцій АЗН-В похибка визначення місцезнаходження знижується до 18-20 м (рис. 2.2).

Фактично станції АЗН-В створюють надмірність псевдодальномерних спостережень і компенсують відсутність видимості повного сузір'я супутників

СРНС. В цілому інтегральні навігаційні системи БПЛА в режимі «ІНС - СРНС - АЗН-В» забезпечують точність навігації 16-18 м [18]. Такий підхід до підвищення точності інтегрованих навігаційних систем БПЛА за рахунок зовнішніх джерел псевдодальномірних сигналів схожий з пропозиціями по створенню локальних РСБН, представлених в роботах [35, 38].

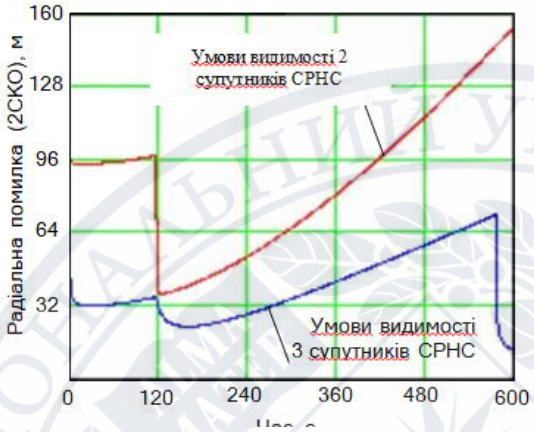

Рис. 2.1. Помилка оцінки координат в режимі «ІНС - СРНС» при видимо- сті 2, 3 навігаційних супутників

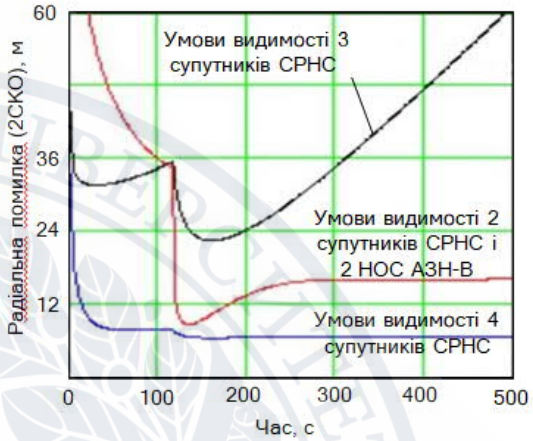

Рис. 2.2 Помилка оцінки координат в режимі «ІНС - СРНС - АЗН-В» при видимості 2, 3, 4 навігаційних супутників

Докладні теоретичні дослідження перешкод захищенності навігаційної системи в режимі «ІНС - СРНС» представлені в роботі [40]. Результати цих досліджень щодо АП СРНС GPS узагальнені в таблиці 2.3.

Порівняльний аналіз ймовірності придушення АП СРНС інтегрованого з ІНС з використанням шумових, гармонійних і загороджувальної імітаційної перешкод дозволяє однозначний висновок про доцільність переходу від «силових» перешкод (шумових і гармонійних) до імітаційних перешкод, що нав'язує навігаційній системі помилковий режим роботи з визначення місця розташування БПЛА і траєкторії його польоту.

В роботі досліджувалися різні варіанти реакції інтегрованих навігаційних систем «ІНС - СРНС» на постановку імітаційних перешкод. Показано, що для забезпечення найкращого нав'язування БПЛА помилкової траєкторії параметри імітаційних перешкод, нав'язується помилкове розташування, а також помилкова траєкторія повинні бути узгоджені з такими параметрами як: місце перебування

БПЛА, швидкість його польоту, дальність до цілі, величина необхідного відхилення від мети, і саме головне - функція дрейфу датчиків мікромеханічних ІНС, при відсутності сигналів СРНС. Формування такого індивідуального режиму придушення для кожного БПЛА вимагає, щоб в формованих імітаційних перешкодах для АП СРНС враховувалася наростаюча помилка ІНС.

Це дозволяє «м'яко» перевести БПЛА на потрібну траєкторію, при цьому на початковому етапі постановки таких інтелектуальну імітаційних перешкод, між даними хибних сигналів СРНС і ІНС НЕ буде спостерігатися критичного неузгодженості, що виключить перехід навігаційної системи в режими навігації без використання СРНС (наприклад , в режим «ІНС - ОЕС - барометр - радіовисотомір»). Це дозволить «прив'язати» БПЛА до помилкових сигналів СРНС, а потім сформувати хибну траєкторію з урахуванням дрейфу показів ІНС в часі. Разом з тим, практична реалізація такого багато параметричного індивідуального режиму перешкод для кожного БПЛА, являє собою складну науково технічну задачу, яка до цих пір не вирішена.

Узагальнюючи вищевикладене, можна зробити висновок, що придушення інтегрованих навігаційних систем БПЛА в режимі «ІНС - СРНС» є принципово можливим. Однак таке придушення вимагає створення територіально-розподіленої угруповання станцій РЕП працюють в режимі псевдо-супутників, при цьому формуються імітаційні перешкоди, що нав'язують помилкову траєкторію польоту, повинні враховувати діапазони дрейфу гіроскопічних датчиків ІНС, а також індивідуальний режим польоту кожного БПЛА. Використання ж енергетичних перешкод (шумових і загороджувальних) для порушення функціонування інтегрованої навігаційної системи БПЛА зв'язано з необхідністю формування високоергічних перешкод, при цьому застосування таких перешкод володіє потенційно низькою результативністю.

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

Одним з відносно нових способів порушення нормального функціонування навігаційної системи БПЛА є вплив на його автономну ІНС акустичними коливаннями. Для протидії БПЛА, оснащених автономними ІНС з мікромеханічними датчиками, можна використовувати потужні акустичні коливання, 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, підібране по частоті акустичний вплив може викликати резонанс в гіроскопі, що призведе до його неправильної роботи і, як наслідок, до видачі помилкових свідчень про місцезнаходження БПЛА. Експерименти, проведені дослідниками з KAIST, показали, що 7 моделей гіроскопів з 15 найбільш часто використовуваних в комерційних малих БПЛА схильні до резонансу.

За результатами подальших розрахунків вченими були зроблені наступні висновки - звукового впливу потужністю близько 140 дБ на резонансній частоті гіроскопа досить, щоб порушити роботу цього приладу на відстані до 40 м від джерела звукового сигналу.

Важливо відзначити, що акустичний вплив на гіроскопи , по-перше, буде ефективно тільки 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 тільки на канал орієнтації в горизонтальній площині, який в ряді моделей БПЛА продубльований магнітометром для кращої стабілізації польоту. В цьому випадку ефективність технічних засобів протидії БПЛА, заснованих на способі акустичного впливу, істотно знижуються [62].

Крім того, саме формування акустичних перешкод на рівні 120-140 дБ, що відповідає лівому порогу або контузії людини, фактично неможливо в населеній місцевості, а також у складі комплексів, в які входять люди-оператори. У зв'язку з цим застосування даного способу придушення на практиці вельми складно.

РОЗДІЛ 3
РАДІОЕЛЕКТРОННЕ ПРИДУШЕННЯ РАДІОЛІНІЙ УПРАВЛІННЯ І ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ БПЛА

3.1. Проблемні питання радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА

Потрібно відзначити, що в порівнянні з завданням радіоелектронного придушення навігаційної системи БПЛА, завдання придушення радіоліній «ПУ - БПЛА» не є принципово новою і фактично зводиться до відомої задачі формування на вході приймача такого значення ЗСШ, яке не дозволяє забезпечити прийом даних з необхідним ступенем достовірності. Дане завдання є класичною в теорії РЕП, а особливістю її рішення, стосовно БПЛА, є облік використовуваних в радіолініях типів сигнально-кодових конструкцій, типів переданих даних (тип переданих даних визначає необхідний рівень достовірності прийому), а також сигнальних, енергетичних, просторових і інших параметрів радіоліній.

При розгляді питань придушення КРУ і каналів передачі даних БПЛА необхідно враховувати, що підсистема управління і радіозв'язку БПЛА являє собою сукупність різних ліній, в яких вдаються дані принципово різного типу, рівня важливості, обсягу, рівня криптографічного захисту й т.д.

Для управління і обміну даними з БПЛА організовуються такі напрямки зв'язку:

- напрям «вгору» - організовується від ПУ до БПЛА і включає в себе:

- напрямок «вгору» КРУ для передачі команд управління БПЛА, а також команд управління спеціальною апаратурою і технічними засобами корисного навантаження, розміщеними на БПЛА;

- напрям «вниз» - організовується від БПЛА до ПУ і включає в себе:

- напрямок «вниз» КРУ для передачі телеметричної інформації (ТМИ) про стан підсистем БПЛА, спеціальної апаратури і технічних засобів корисного навантаження, а також квитанцію про виконання команд управління;

- високошвидкісна лінія передачі даних від спеціальної апаратури і технічних засобів корисного навантаження, розміщених на БПЛА.

Вищевказані лінії зв'язку можуть організовуватися в різних частотних діапазонах, використовувати різні режими з ретрансляцією і без неї, використовувати різні сигнально-кодові конструкції, спеціально адаптовані під тип і важливість переданих даних.

Найбільш критичним елементом для функціонування БПЛА є КРУ. Саме придушення КРУ за напрямом «вгору» здатне забезпечити максимальний ефект з точки зору порушення нормального функціонування БПЛА. Разом з тим при вирішенні даного завдання зустрічається ряд труднощів:

- розтин параметрів лінії КРУ «вгору» вимагає спостереження за ПУ, при цьому ПУ може перебувати в істотному видаленні від засобів РЕП (до 30-50 км) і використовувати для організації зв'язку антенну систему з гостро направленної ДНА (близько 5-10 °) і з придушенням бічних пелюсток, що різко знижує можливості засобів РРТР в складі комплексу РЕП щодо розкриття параметрів КРУ БПЛА значущих для її придушення;

- варіанти організації КРУ на одних і тих же частотах в дуплексному режимі зустрічаються виключно на простих малих БПЛА. Досить часто зустрічається варіантом організації КРУ для БПЛА спеціального призначення є формування напрямків «вгору» і «вниз» не тільки на різних частотах, але навіть в різних частотних діапазонах (L, C, S, Ku діапазони), і з різними частотно-часовими параметрами. В результаті успішне розкриття параметрів КРУ «вниз», при підльоті БПЛА до контрольованого рубежу, не дозволяє сформувати цілевказівки засобів РЕП для придушення КРУ в напрямку «вгору»;

- в КРУ, як в найбільш важливий елемент системи управління БПЛА, широко використовуються різні способи підвищення перешкодозахищеності: ШПС, автоматична перебудова частоти на найменш уражені перешкодами канали, використання режиму ППРЧ, резервування каналів, багаторазове дублювання команд управління і переданих ТМИ, використання антен з спрямованими ДНА, високий рівень крипто захисту переданих даних і т.д.

Однак першочерговими є чи не ці труднощі, а то, що навіть успішне розкриття і придушення КРУ не гарантує, що БПЛА припинить свій політ в напрямку контрольованої зони. Як правило при відсутності зовнішнього управління, БПЛА переходить в автономний режим, при цьому його дії в цьому режимі повністю визначаються попередньо закладеної програми автономного польоту. При цьому суттю програми може бути не «повернення до ПУ», а продовження подальшого польоту до контрольованого об'єкту і виконання цільової завдання з використанням всіх доступних способів навігації. Для БПЛА, які використовуються в незаконних або військових цілях, саме ця програма реалізується найчастіше.

Таким чином, придушення КРУ може знизити ймовірність успішного виконання БПЛА цільової завдання, але не гарантує будь-яких однозначних дій по припиненню польоту БПЛА в напрямку контрольованого кордону, активації «програми повернення» або «програми посадки» і т.д. Саме відсутність однозначної реакції БПЛА на успішне придушення КРУ є істотним недоліком комплексів протидії БПЛА заснованим виключно на РЕП.

Наступною за важливістю радіоліній БПЛА, яка є вразливою для засобів РЕП, є лінія «вниз» в напрямку «БПЛА - ПУ», призначена для передачі даних від спеціальної апаратури і технічних засобів корисного навантаження, розміщених на БПЛА. Справа в тому, що досить поширеним способом управління БПЛА залишається режим ручного управління ним з боку оператора по візуальним даними від ОЕС видимого діапазону. Особливістю цієї лінії є наступне.

Передані від ОЕС на ПУ віддання мають великий обсяг, вимагають широкої смуги частот для передачі, і в зв'язку з їх високими швидкостями та необхідністю передачі в режимі реального часу, можуть не піддаватися криптозахисті навіть на БПЛА спеціального і військового призначення. При цьому складність організації на БПЛА великорозмірних гостро направлених антенних систем, веде до того, що часто ці дані передаються або через все спрямовану антену, або через антену з широким головним пелюсткою ДНА (порядку 60-90 °). Це дозволяє відносно легко не тільки розкривати сигнально-частотні параметри даної лінії зв'язку, а й отримувати доступ до переданих відеоданих. Придушення такої лінії потенційно б дозволило позбавити оператора візуальної зворотного зв'язку, і примусити його управляти БПЛА, так би мовити, «за приладами» тобто тільки за даними ТМИ надходять по КРУ «вниз», що різко б знизило ефективність і ергономічність управління.

Разом з тим високоефективне придушення цієї лінії зв'язку вимагає знання місця розташування ПУ або проміжного вузла ретранслятора, використовуваних для управління БПЛА. При цьому висота польоту БПЛА, а також можливість розміщення ПУ або вузлів ретрансляторів на літальних підйомних засобах, потенційно забезпечують більший радіогоризонта і, як наслідок, більш високу дальність організації зв'язку прямої видимості, ніж дальність дії наземних засобів РЕП. В результаті вельми вірогідна ситуація, коли при наявності повної інформації про сигнально-частотних параметрах лінії «вниз» буде неможливо придушити ПУ і вузли ретранслятори, з огляду на їх просторової недоступності для наземних засобів РЕП.

Вищевказане відноситься до переважної числа БПЛА і є фундаментальними обмеженнями, що накладаються на ефективність існуючих комплексів РЕП, орієнтованих на протидію БПЛА. Далі будуть більш детально розглянуті різні технічні аспекти проблематики придушення каналів управління і зв'язку з БПЛА, при цьому більшу увагу буде приділено питанням придушення каналів малих БПЛА, як найбільш небезпечних і складних об'єктів для протидії.

3.2. Особливості організації зв'язку в командній радіолінії управління БПЛА

Командна радіолінія управління в напрямках «вгору» і «вниз» призначена для передачі найбільш критичних даних для процесу нормального управління польотом БПЛА: команд управління з ПУ та квитанцій про їх виконання, програм польоту, програм дій в автономному режимі, навігаційних та спеціальних даних, що забезпечують нормальне функціонування БПЛА, а також ТМИ про стан окремих підсистем, залишок палива і т.д. Зазначені дані, як правило, мають відносно малий обсяг і необхідну швидкість передачі (близько 2,4-200 кбіт / с), однак, посадового не передаються в масштабі реального часу.

Для великих і середніх БПЛА спеціального і військового призначення, як правило КРУ організовується в режимі прямої видимості з наземним або віз задушливим ПУ, а при значній відстані ПУ - ретрансляцією через вузол-ретранслятор на літально-підйомному засобі або через ССС. Для малих БПЛА як спеціального, так і комерційного призначення КРУ організовується в режимі прямої видимості з наземним ПУ.

3.2.1. Спеціальні та військові БПЛА

Узагальнюючи матеріали дослідження можемо сформувати наступні узагальнені ТТХ КРУ спеціальних і військових БПЛА, які є значущими для радіоелектронного придушення.

При організації КРУ спеціальних і військових великих і середніх БПЛА через ССС, як правило, використовуються ССС Irudum, Inmarsat, MOUS, WGS, при цьому лінії зв'язку формуються в УКХ, L, X, Ku, Ka діапазонах. У УКХ діапазоні використовуються низько швидкісні канали шириною по 25 кГц з QPSK сигналами. В L, Ku, X і Ka діапазонах виробляється «упаковка» КРУ в широкосмуговий загальний супутниковий канал ССС (наприклад, серцево-судинної системи Iridium, Inmarsat або WGS), на основі кодового (CDMA - Code Division Multiple Access) або частот-тимчасового (MF-TDMA - Multi-Frequency Time-Division Multiple Access) поділу абонентів з використанням BPSK, QPSK, 8PSK, 8QAM сигналів. Ширина головної пелюстки ДНА супутникового зв'язку на БПЛА становить близько 10-35 ° [10].

Для управління спеціальними та військовими малими БПЛА (наприклад, такими як RQ-7B Shadow 200, RQ-11B Raven, RQ-16T-Hawk і ін.), як правило, організовується КРУ в режимі прямої видимості з наземним ПУ або з вузлом - ретрансляції :

- канали в L (1,4-1,85 ГГц), S (2,2-2,5 ГГц), C (4,4-5,85 ГГц), і Ku (15,15-15,35 / 14,4-14,83 ГГц) діапазонах - основні канали КРУ;

- в УКХ діапазоні (220-400 МГц) - резервні канали КРУ;

- супутниковий канал (як правило використовується низькоорбітальна ССС Iridium забезпечує можливість використанням невеликих антен) L-діапазону (1,616-1,6265 ГГц) - резервний канал КРУ, встановлюваний опціонально на окремих БПЛА.

Ширина каналів:

- канал «вгору» в L, S, C і Ku діапазонах: в режимі фіксованої частоти - 300-700 кГц; в режимі ШПС - 0,7-28 МГц;

- канал «вниз» в L, S, C і Ku діапазонах: 3-20 МГц;

- канали «вгору» / «вниз» в УКХ діапазоні: 25 кГц.

Швидкості передачі даних в КРУ:

- до 20 кбіт / с - в лінії «вгору»; 200 кбіт / с - в лінії «вниз» (при пере- дачі тільки ТМИ); 1,6-12 Мбіт / с - в лінії «вниз» (при передачі ТМИ спільно з даними від ОЕС БПЛА для візуального управління оператором) в L, S, C і Ku діапазонах;

- 2,4-16 кбіт / с в лініях «вгору» / «вниз» в УКХ діапазоні;

- до 2,4 кбіт / с в лініях «вгору» / «вниз» по супутниковому лінії L діапазону (для ССС Iridium);

Потужності передавачів:

- в L, C, S, Ku діапазоні в каналах «вгору» / «вниз»: 5-15 Вт;

- в УКХ діапазоні в каналах «вгору »/« вниз »: 15-25 Вт.

Використовувані типи сигналів: BPSK, QPSK (DQPSK, SOQPSK), 2FSK, GMSK. Можливе використання режиму ППРЧ в межах дозволеної до використання смуги частот в S, C і Ku діапазонах (наприклад, зустрічаються варіанти організації КРУ БПЛА з використанням режиму ППРЧ по 10 каналам шириною по 4 МГц кожен в загальній смузі 40 МГц). Тип завадостійкого кодування: коди Ріда-Соломона, точне кодування, кодування Вітербо, турбо-кодування, LDPC-кодування. Швидкості коду R = 1/2, 2/3, 3/4.

Типи багатостанційного доступу: «точка-точка», багатостанційний доступ БПЛА в режимах частотного (FDMA - Frequency Division Multiple Access) і тимчасового (TDMA - Time-Division Multiple Access) поділу абонентів. на БПЛА, що стоять на озброєнні країн НАТО, формат даних КРУ, порядок передачі та обробки команд визначається стандартами STANAG: 4586, 4660 і 7085. Для криптографічного захисту даних в КРУ спеціалізованих і військових БПЛА використовується шифрування відповідно до стандартів: MIL-STD-188-181A, MIL-STD-188-183, NSA Type I, Triple DES, AES-128, AES-256.

На БПЛА використовуються або все спрямовані антени, або спрямованість ні антени з шириною ДНА порядку 60-90 ° і посиленням 2-4 дБи. Наземні ПУ використовують стежать за БПЛА поворотні антени діаметром до 1,2 м з посиленням до 40 дБі з гостро направленої ДНА до 3,5-5 °.

Діяльність зв'язку:

- в напрямку ПУ - БПЛА з використанням спрямованих антен на ПУ: до 75 км;

- в напрямку ПУ - БПЛА / ПУ - БПЛА з використанням не напрямлених антен: до 15 км;

- в напрямку БПЛА - ПУ з використанням спрямованих антен на БПЛА і ПУ: до 55 км.

3.2.2. Комерційні БПЛА

Для комерційних малих БПЛА, напряму «вгору» / «вниз» КРУ організовуються в фіксованих частотних діапазонах, які, як правило, відповідають використанню на БПЛА однієї або декількох комерційних технологій зв'язку:

- RC433: 433 МГц;

- мережі 4G: 725-770, 790-830, 850-894 МГц; { {1}} - мережі CDMA: 850-894 МГц:

- RC868: 868-916 МГц;

- GSM900: 890-915, 935-960 МГц;

- GSM1800 : 1710-1880 МГц;

- мережі 3G: 2110-2170 МГц;

- мережі Wi-Fi на базовій частоті 2,4 ГГц: 2,4-2,5 ГГц;

- мережі 4G: 2,5-2,7 ГГц;

- мережі Wi-Fi на базовій частоті 5,2 ГГц: 4,9-5,5 ГГц;

- мережі Wi -Fi на базовій частоті 5,8 ГГц: 5,5-6,1 ГГц.

Використовувані типові частоти, ширина типових каналів, типи сигналів і завадостійкого кодування, потужності передавачів і ТТХ приймальних засобів визначаються відповідними стандартами на вищевказані технології зв'язку. Дані щодо найбільш поширеним стандартам Wi-Fi, використовуваним для управління малими комерційними БПЛА, представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Дані по найбільш поширеним стандартам Wi-Fi, який використовується для управління комерційними малими БПЛА

Характеристика	Wi-Fi IEEE 802.11b	Wi-Fi IEEE 802.11g	Wi-Fi IEEE 802.11n
Діапазон частот, ГГц	S (2,4-2,483)	S (2,4-2,483)	S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)
Ширина каналу, МГц	22	22	20, 40
Потужність передавача, дБм	до 20	до 20	до 20
Технологія поділу каналів	FDMA	FDMA, OFDM	FDMA, OFDM
Сигнали	DBPSK,DQPSK	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM,64QAM
Перешкодостійке кодування	код Баркера, комплементарні послідовності, точне кодування		точне кодування *R*=5/6
Швидкість передачі даних, Мбіт / с	до 11	до 54	до 100
Додаткові технології перешкоді захисту	Стандартом передбачена можливість використання DSSS і ППРЧ		Стандартом передбачена можливість використання HR-DSSS і MIMO
Шифрування (опціонально) *	WEP, WPA, DES, AES-128, AES-256		

* Шифрування даних в комерційних БПЛА може не використовуватися.

Особливістю організації каналу «вниз» КРУ в малих комерційних БПЛА є, то, що фактично сам канал відсутній, а роль ТМИ від БПЛА виконують відеодані, що надходять від ОЕС БПЛА і призначений для візуального управління з боку оператора. ТТХ каналоутворюючої апаратури різних КРУ малих комерційних БПЛА представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - ТТХ каналоутворюючої апаратури різних КРУ малих комерційних БПЛА

Параметр	Значення параметрів				
Найменування КРУ	3D Link	Skyhopper PRO	Picoradio OEM	SOLO7	J11
Виробник, країна	Geoscan, РФ	Mobilicom, Ізраїль	Airborne Innovation, Канада	DTC, Великобританія	Redess, Китай
Діапазон частот, ГГц	S (2,4-2,483), C (5,725-5,875)				
Дальність зв'язку, км	20-60	5	н/д	н/д	10-20
Швидкість передачі даних, Мбіт / с	0,023-64,9	1,6-6	0,78-28	0,144-31,668	1,5-6

Продовження таблиці 3.2

Затримка передачі даних, мс	1-20	25	н/д	15-100	15-30
Потужність передавача, дБм	25	н/д	27-30	20	30
Чутливість приймача, дБм:	–78,6... −122	−101	–76... −101	–95... −104	–90... −97
Енергетичний бюджет КРУ, дБ	103-147	н/д	103-131	н/д	120-127
Підтримувані смуги частот, МГц	4-20	4,5; 8,5	2; 4; 8	0,625; 1,25; 2,5; 6; 7; 8	2; 4; 8
Режим організації зв'язку	Дуплекс	Дуплекс	Дуплекс	Симплекс	Дуплекс
Підтримка рознесеного прийому	да	да	да	да	да
Окремий канал для управління / телеметрії	да	да	да	немає	да
Використовувані протоколи управління БПЛА в КРУ / ТМИ	MAVLink, пропрієтарні	MAVLink, пропрієтарні	немає	немає	MAVLink
Підтримка мультиплексування в каналі КРУ / ТМИ	да	да	немає	немає	н/д
Використовувані мережеві топології:					
«Точка - точка»	да	да	да	да	да
«точка - багатоточка»	да	да	да	немає	да
ретрансляція даних	да	да	да	немає	да
Засоби підвищення перешкодозахищеності	DSSS, подавителі вузькосмугових і імпульсних перешкод	н/д	н/д	н/д	н/д

Енергоспоживання блоку зв'язку на БПЛА, Вт	6-7	н/д	4,8	4,5-7	8
Енергоспоживання блоку зв'язку на ПУ, Вт	7	н/д	4,8	8	5
Габарити бортового блоку, довжина × ширина × висота, мм	77×45×25	74×54×26	40×40×10 (без корпу-са)	67×68×22	76×48×20
Маса бортового блоку, г	89	105	17,6 (без корпуса)	135	88

3.3. Особливості радіоелектронного придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА

Ефективність придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА визначається наступними факторами:

- умовами поширення радіохвиль на трасі радіоліній БПЛА - ПУ, а також на трасі радіоподавлення;

- енергетичної, часової і просторової доступністю приймачів засобів зв'язку на БПЛА і ПУ для засобів РЕП, а також їх чутливість;

- потужністю передавачів засобів зв'язку БПЛА і ПУ, а також засобів РЕП;

- типом антенних систем, взаємної орієнтацією ДНА засобів зв'язку БПЛА і ПУ, а також засобів РЕП;

- використовуваними для передачі шириною смуги частот, типом сигналу, типом завадостійкого кодування, швидкістю коду.

Для придушення радіоліній управління і передачі даних БПЛА використовуються наступні типи перешкод:

1) Перешкоди, що перекривають робочий діапазон частот, імовірно використовується для організації зв'язку з БПЛА. Даний тип перешкод використовується при відображенні масованого нальоту БПЛА, коли неможливо розкрити параметри приватних КРУ окремих БПЛА і потрібно перекрити весь використовуваний діапазон частот, або ж при неможливості засобами РРТР розкрити частотні параметри ліній зв'язку.

До таких перешкод відносяться:

- загороджувальна шумова перешкода (білий шум високої потужності) у всьому діапазоні частот;

- вузько смугова шумова або гармонійна (одночастотне або модульоване гармонійне коливання) перешкода, що ковзає по діапзону частот.

1) Перешкоди, прицільні по частоті ліній управління і зв'язку БПЛА. Даний тип перешкод використовується при придушенні одиночних БПЛА або групи БПЛА, керованих по одній КРУ, коли засобами РРТР достовірно розкриті частотні параметри ліній зв'язку. До таких перешкод відносяться:

- шумова перешкода, прицільна по частоті лінії зв'язку;

- гармонійна перешкода, прицільна по частоті лінії зв'язку;

- вузько смугова шумова або гармонійна перешкода, що ковзає по використовуваному діапазону частот (при використанні ліній зв'язку з ШПС або ППРЧ);

- імітує перешкода, прицільна по частоті лінії зв'язку і структурі переданих сигналів (імітує структуру сигналів лінії зв'язку);

- імітує перешкода, прицільна по частоті і структурі сигналу, а також за структурою і формату даних, що передаються (імітує неправдиві дані, що передаються по лінії зв'язку), з метою нав'язування помилкових режимів роботи.

Ефективність придушення може бути підвищена якщо засобами моніторингу розкривається очікувана траєкторія польоту БПЛА і засоби РЕП можуть формувати вищевказані перешкоди прицільно по напрямку на БПЛА або його ПУ за рахунок зміни орієнтації ДНА антенних систем.

В даний час широкого поширення набули шумові перешкоди, прицільні по частотах ліній зв'язку БПЛА - ПУ. При цьому, з огляду на більш високу ефективність, перспективним є використання імітують перешкод, прицільних за структурою сигналу. Однак цей режим придушення складніший в реалізації і, по всій видимості, буде реалізований в засобах РЕП наступного покоління.

При організації придушення ліній управління і передачі даних БПЛА кошти РЕП, як прищепило, дотримуються такої логіки функціонування.

1) При виявленні факту нальоту БПЛА кошти РРТР намагаються розкрити частотні параметри ліній радіозв'язку «вгору» і «вниз». Якщо розтин частотних параметрів даних ліній неможливо, то засіб РЕП переходить в режим випромінювання загороджувальних або ковзають перешкод по всьому діапазону частот, потенційно використовуваному для організації зв'язку з БПЛА по ліням «вгору» / «вниз». В цей же режим засіб РЕП переходить в разі якщо кількість розкритих ліній зв'язку перевищує можливості засобів РЕП з постановки перешкод, прицільних за частотою і за напрямком.

2) Якщо вироблено успішне розкриття частотних параметрів ліній «вгору» / «вниз», то кошти РРТР намагаються визначити сигнально структурні та просторові параметри цих ліній. Якщо розтин таких параметрів неможливо, то по раніше визначеним частотним параметрами формуються шумові або гармонійні перешкоди, прицільні по частоті. Цей же тип перешкод формується якщо успішне розкриття сигнальних і структурних параметрів радіолінії показує, що дані радіолінії мають високостійкий криптографічний захист.

3) Якщо функціонал кошти РЕП дозволяє управляти ДНА, то постановка перешкод лінії «вгору» здійснюється з урахуванням орієнтації ДНА на БПЛА і його траєкторного супроводу. Якщо за результатами розтину просторових параметрів радіоліній виразно напрямок на ПУ, то постановка перешкод лінії «вниз» здійснюється з урахуванням орієнтованості ДНА засобів РЕП на ПУ БПЛА.

4) Якщо за результатами розтину сигнально-структурних параметрів радіоліній визначені тип і структура сигналів і ширина сигналу дозволяє зробити його запис та відтворення [10], то імітаційні структурно-прицільні перешкоди формуються шляхом циклічного відтворення на частоті лінії раніше записаного сигналу. Якщо визначені тип і структура сигналів, але ширина сигналу не дозволяє зробити його запис, наприклад, внаслідок того, що використовується сигнали ШПС або ППРЧ, то використовується або широкосмугова шумова перешкода в смузі частот радіолінії, або вузько смугова шумова або гармонійна перешкода, що ковзає по смузі частот радіолінії.

5) Якщо за результатами розтину сигнально-структурних параметрів радіоліній визначені не тільки тип і структура сигналів, але також розкриті формат і структура переданих даних, тип використовуваного протоколу або зв'язку, то з'являється можливість підміни керуючих команд БПЛА або передачі помилкових даних шляхом формування імітує перешкоди, прицільної по частоті і структурі сигналу, а також за структурою і формату даних, що передаються. Цей же тип перешкод може бути сформований якщо в лінії використовується вразливий або має низьку криптографічний захищеність протокол шифрування. Найбільш поширеним прикладом такого придушення є розтин формату переданих відеоданих в каналу «вниз», із записом і подальшим циклічним відтворенням раніше переданого відео, що фактично блокує зворотний зв'язок для оператора.

Приблизна оцінка ефективності придушення ліній управління і передачі даних може бути оцінена шляхом використання двох основних, щодо простих, підходів:

- розрахунок перешкодозахищеності (за показником BER (Bit Error Rite) - ймовірності помилкового прийому біта Pb) використовуваної в радіолінії комбінації сигналу і завадостійкого коду при досягненому значенні ЗСШ на вході приймача, з наступним порівнянням її з граничними необхідними значеннями Pb тр для використовуваного протоколу зв'язку;

- розрахунок енергетичного бюджету радіолінії, з наступним порівнянням отриманого значення з граничними значеннями чутливості приймача.

При використанні цих підходів передбачається, що перешкода являє собою адитивний білий гауссівський шум (АБГШ) в смузі частот сигналу. Питання відомості складних мультиплікативний перешкод до еквівалентним адитивним перешкод, розглянуто в роботі.

Значення ЗСШ q на вході приймача при постановці шумової перешкоди засобом РЕП в радіолінії дорівнює (рис. 3.1):

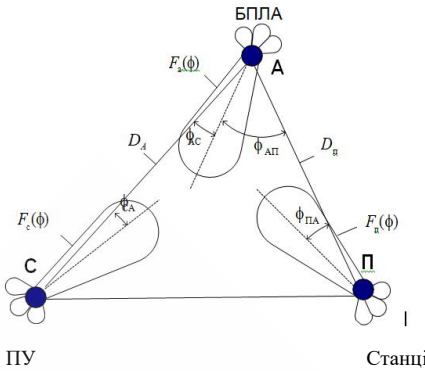

Рис. 3.1. Варіант взаємного положення в просторі БПЛА, ПУ і станції РЕП

Знання значення ЗСШ на вході ПЗМ і за видом сигналу дозволяє визначити значення ймовірності помилкового прийому біта Pb. Порівняння значення Pb з необхідними значеннями Pb тр для КРУ і каналу передачі даних (таблиця 3.3) дозволяє зробити висновок про потенційну ефективність придушення.

Таблиця 3.3 - Необхідні значення достовірності передачі даних для КРУ і каналу передачі даних

Параметри	КРУ «вгору»	КРУ «вниз»	Лінія передачі даних «вниз»
Передана інформація	Команди управління	ТМИ	Дані від бортових коштів ОЕС, РЛС і т.д.
Протоколи передачі	IP/TCP, X.25, MAVlink,SLT.DSM, XBee, пропрієтарні протоколи		DVB, MPEG-TS,MPEG-2/4, H.264
Необхідна достовірність передачі даних, *Pb* тр	10^{-6}		10^{-3}

У теоретичних роботах для обліку різних особливостей прийому BPSK, QPSK і M-QAM, сигналів обґрунтовуються різні аналітичні вирази для розрахунку ймовірності помилки на біт Pb, достатні для інженерного застосування, в залежності від енергетичних співвідношень ЗСШ з АБГШ. На основі цих виразів, наприклад, в роботах розраховані значення Pb для типових сигнально-кодових конструкцій, які використовуються в радіокомунікацій з БПЛА - рис. 3.2.

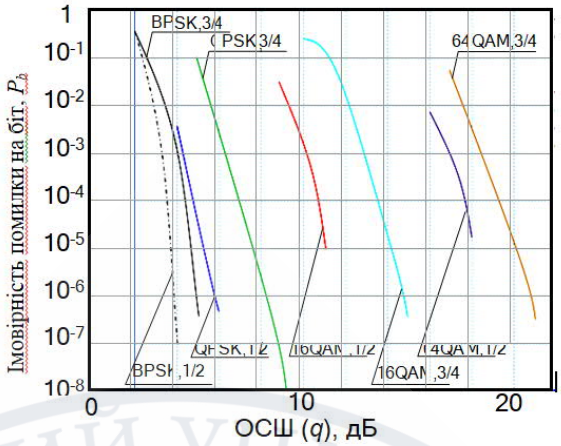

Рис. 3.2. Залежність ймовірності бітової помилки Pb від ЗСШ для типових сигнально-кодових конструкцій, які використовуються в радіокомунікацій з БПЛА

Для корекції і експериментальної перевірки аналітичних виразів оцінки помехозащищенности Pb (q), для найбільш поширених сигналів, типів кодування (таблиця 4 і 7), а також умов застосування БПЛА були проведені експериментальні дослідження. Експерименти проводилася за методикою, представленою в роботі. При цьому розглядалися нижченаведені моделі багатопроменевого поширення.

1. Модель гауссовской лінії - відповідає радіолінії з АБГШ, в котором багатовипромінюваність повністю відсутня, тобто розглядається єдиний прямий промінь між ПРД і ПЗМ. Таким чином, дана модель описує ідеальні умови поширення на трасі «ПУ - БПЛА», які, як правило, не зустрічаються на практиці, але часто відповідає верхній межі оцінки перешкодозахищеності Pb, отриманої розрахунково-теоретичним шляхом.

2. Модель райсовської лінії - відповідає радіолінії з перешкодами (АБГШ, імпульсні і гармонійні перешкоди), моделює наявність прямого променя і декількох відображених променів з різними потужністю і затримками приходу в точку прийому, статистичні властивості яких описуються розподілом ймовірностей Райса. Дана модель відповідає умовам польоту БПЛА в прямій радіовидимості ПУ, з урахуванням перетворювання електромагнітних хвиль від поверхні Землі та інших об'єктів.

3. Модель релєєвської лінії - відрізняється від райсовської відсутності прямого променя, при цьому статистичні властивості відбитих променів описуються розподілом ймовірностей Релея. Відповідає умовам польоту БПЛА за відсутності прямої радіовидимості ПУ на відносно низькій висоті в пересіченій місцевості або в висотної міській забудові.

Дослідження лінії радіозв'язку ПУ - БПЛА проводилися для QPSK, 16QAM, 64QAM сигналів. Як перешкодостійкого коду використовувалося кодування Вітербо зі швидкостями R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8. Як перешкоди розглядалася шумова перешкода - АБГШ. При обліку багатопроменевого поширення радіохвиль використовувалися стандартні моделі каналів RC20 і RL20. Вплив доплерівського зсуву частот не враховувався. Результати експериментальної оцінки перешкодозахищеності КРУ з QPSK, 16QAM, 64QAM сигналами, при типовій швидкості кодування R = 3/4, представлені у вигляді середнього значення ймовірності помилки на біт Pb, який відповідає ймовірності помилкового прийому біта після різних етапів декодування (рис. 3.3 і 3.4) - на вході декодера Вітербо ($P_{b\ in\ Vit}$) і на виході декодера ($P_{b\ out\ Vit}$).

Аналіз графіків на рис. 3.3 показав наступне. Значення показників $P_{e\ out\ Vit}$ на виході декодера Вітербо в райсовської лінії (політ БПЛА в прямій радіовидимості ПУ) відповідає погіршення їх на 1,5-5 дБ щодо гаусом лінії, що відповідає значенню втрат за рахунок прийому перевід биттів сигналів. У міру зростання ЗСШ q збільшується відхилення показників $P_{b\ out\ Vit}$, що відповідає зміні структури помилок (спостерігається групування помилково прийнятих біт) в радіолінії і на виході декодера Вітербо.

Аналогічний ефект характерний і для релєєвської моделі радіолінії (політ БПЛА в відсутності радіовидимості ПУ в пересіченій місцевості або в міських умовах) - рис. 3.4. Спостерігається зсув значень $P_{b\ out\ Vit}$ на виході декодера Вітербо на 10-20 дБ вправо, в релєєвської лінії щодо гауссовской, а також серії помилкових бітів (до 10 біт), розділених інтервалами безпомилкового прийому до декількох десятків секунд. Дане дослідження якісно і кількісно відповідає результатам, отриманим в роботі.

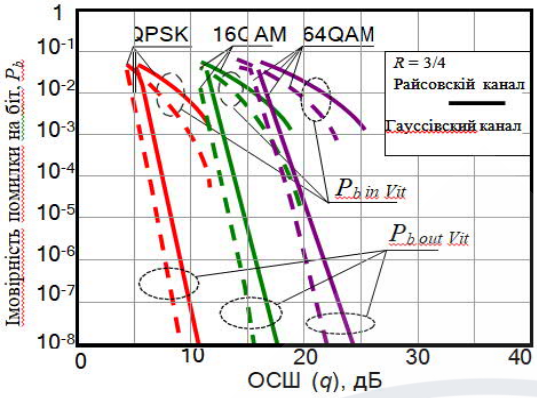

Рис. 3.3. Залежність Pb (q) на вході (Pb in Vit) і виході кодера Вітербо (Pb out Vit) для гауссовской і райсовской радіоліній

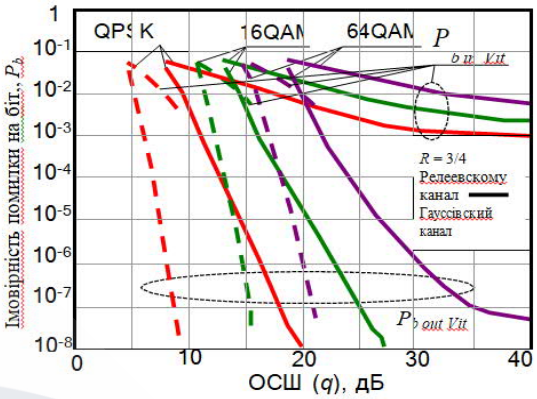

Рис. 3.4. Залежність Pb (q) на вході (Pb in Vit) і виході кодера Вітербо (Pb out Vit) для гауссовской і релеевської радіоліній СРНС [58]

Оцінка вкладу завадостійкого кодування в підвищення перешкодозахищеності радіоліній зв'язку з БПЛА проводилося шляхом оцінки значення ймовірності помилки на біт на вході (P*b in Vit*) і на виході декодера Вітербо (P*b out Vit*). Дані значення для райсовской і релєєвської радіоліній для кодових швидкостей R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 для сигналу 64QAM представлені на рис.3.5.

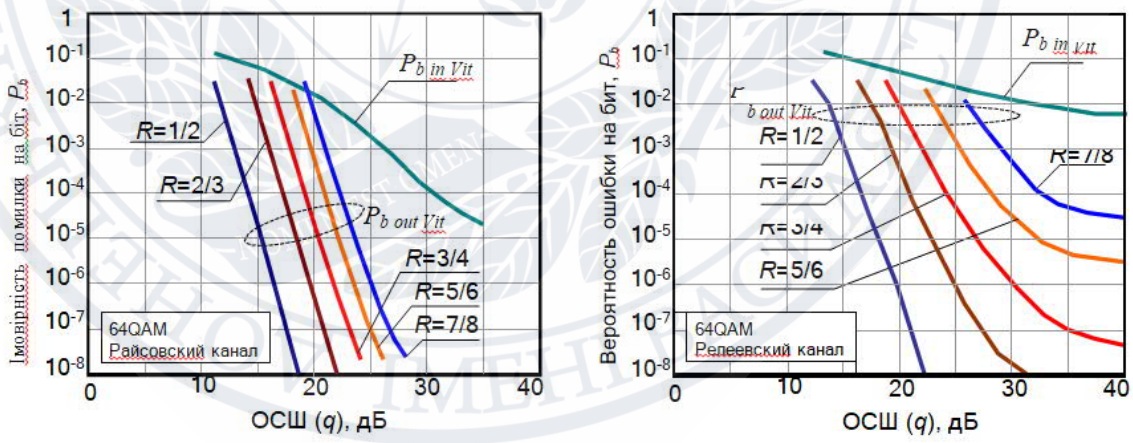

Рис 3.5. Вплив значення швидкості коду на стійкість лінії радіозв'язку

За результатами аналізу можна сформувати приблизні граничні значення ЗСШ q (таблиця 3.4), при яких досягається необхідний рівень достовірності прийому для типових схем сигнально-кодових конструкцій, які використовуються в КРУ і в лінії передачі даних. При орієнтуванні на ці дані слід

мати на увазі, що, як правило, розробниками КРУ закладається додатковий запас на стійкість близько 10 дБ. З

Зазначені в таблиці 3.4 дані є дуже приблизною і грубої оцінкою, остаточна оцінка необхідних енергетичних витрат необхідних для порушення функціонування КРУ і лінії передачі даних засобами РЕП проводиться після розтину сигнально-кодових конструкцій, які використовуються в радіолініях «ПУ - БПЛА». значення ОШП в таблиці 3.4 не враховують можливості використання таких способів підвищення перешкодозахищеності як розширення бази сигналу або використання режиму ППРЧ. Питання впливу перешкод на такі складні типи сигналів як ШПС і ППРЧ розглянуті в роботах і відповідно.

Таблиця 3.4 - Приблизні значення ЗСШ при яких досягається необхідний рівень достовірності прийому в радіолініях зв'язку «ПУ - БПЛА» для типових схем сигнально-кодових конструкцій

Умови польоту	Тип радіолінії, тип переданих даних	Необхідна достовірність прийому, $P_{b\,тр}$	Значення ЗСШ при якому досягається необхідна достовірність прийому, дБ									
			BPSK, 1/2	BPSK, 3/4	QPSK, 1/2	QPSK, 3/4	16QAM, 1/2	16QAM, 3/4	64QAM, 1/2	64QAM, 3/4	64QAM, 5/6	64QAM, 7/8
Політ БПЛА в прямій радіовидимости ПУ	КРУ «вгору», команди управління БПЛА	10^{-6}	6	7	8	9	14	16	17	22	24	25
	КРУ «вниз», ТМИ для ПУ, квитанції про виконання команд											
	Радіолінія передачі даних «вниз», віддання від ОЕС *	10^{-3}	4	5	6	7	11	13	14	18	19	21
Політ БПЛА в відсутності радіовидимости ПУ, в пересіченій місцевості або в	КРУ «вгору», команди управління БПЛА	10^{-6}	11	13	16	17	21	23	20	30	46	н/д
	КРУ «вниз», ТМИ для ПУ, квитанції про виконання команд											
	Радіолінія передачі даних «вниз», віддання від ОЕС *	10^{-3}	7	8	10	11	14	16	16	22	25	28

Для оцінки перешкодозахищеності інших сигнально-кодових конструкцій, які не вказані в таблиці 9, автор рекомендує звернутися до досить повного довідником.

Підводячи підсумок оцінці можливостей придушення ліній КРУ і передачі даних, необхідно ще раз акцентувати увагу на те, що незважаючи на достатні можливості існуючих засобів РЕП з ефективного придушення цих ліній, таке придушення не гарантує будь-якої певної реакції БПЛА у вигляді припинення польоту БПЛА в напрямку контрольованого кордону, активації «програми повернення» або «програми посадки» і т.д. Саме відсутність однозначної реакції БПЛА на успішне придушення радіоліній є істотним недоліком комплексів протидії дії БПЛА заснованим виключно на РЕП.

3.4 Особливості інформаційно-технічного впливу з метою втручання в процес функціонування систем БПЛА або перехоплення управління

Якщо за результатами аналізу КРУ засобами РРТР вдається визначити не тільки тип і структуру сигналів, але також розкрити формат і структуру переданих даних, тип використовуваного протоколу управління або кодека зв'язку, то з'являється можливість підміни керуючих команд БПЛА або передачі помилкових даних шляхом формування імітує перешкоди, прицільної по частоті і структурі сигналу, а також за структурою і формату даних, що передаються.

Фактично завдання розтину формату і протоколу переданих дан них в КРУ відноситься вже не до завдань, які вирішуються засобами РРТР, а до завдань засобів форматної, потокової і мережевий комп'ютерної розвідки (КР). При цьому формування вищевказаного типу перешкод відповідає вже не «чистому» РЕП, а, більшою мірою, навязування помилкового управління або інформаційно-технічного впливу (ІТВ) на БПЛА реалізованого через його КРУ.

Одним з основних переваг впливу ІТВ на БПЛА є її скритність. Відсутність явних ознак деструктивних впливів на БПЛА, істотно ускладнює своєчасне і адекватне вживання заходів протидії з боку ПУ і операторів системи.

Доступ коштів КР до форматів даних, що передаються КРУ можливий якщо в ній використовується протокол шифрування з низькою кріптостійкість, або протокол шифрування не використовується взагалі.

Для БПЛА, в яких КРУ реалізується на основі комерційних технологій Wi-Fi, WiMAX Mobile і LTE, засобами КР можуть експлуатуватися такі уразливості:

- підміна даних авторизації при встановленні або підтримці з'єднання в КРУ;

- використання в Wi-Fi для шифрування даних, що передаються протоколів WEP (Wired Equivalent Privacy) і WPA (Wi-Fi Protected Access), які мають низьку криптографічний стійкість, при цьому з-Вестн способи, що дозволяють розкрити ключову інформацію за лічені число хвилин;

- використання в WiMAX Mobile для шифрування алгоритму DES (Data Encryption Standard) з ключами TEK (Traffic Encryption Key), які мають обмежений термін дії, а також використання неправдивих сертифікатів ідентифікації абонентських станцій X.509;

- уразливості процедур «attach», «detach» і «paging» для мереж LTE і т.д.

Після доступу засобів КР до форматів переданих в КРУ даних, аналізу їх структури і особливостей, з'являється можливість зробити висновок про наступні аспекти управління БПЛА:

- використовувані протоколи і формати передачі даних в КРУ на канальному, мережевому і транспортному рівнях моделі OSI (Open System Interconnect);

- використовуваний протокол управління БПЛА;

- поточна задача БПЛА, поточна послідовність виконуваних команд;

- дані про стан підсистем БПЛА (в складі ТМИ) , дані від бортових коштів корисного навантаження (передусім ОЕС);

- місце розташування БПЛА за даними від бортової навігаційної системи;

- структура адресації, маршрутизації, а також пріоритетності при передачі команд управління та даних корисного навантаження в мережі управління групою БПЛА;

- типи використовуваних на БПЛА і ПУ керуючої операційної системи (ОС), програмного забезпечення (ПО), мікроконтролерів (МК) керування радіомережею, окремими бортовими підсистемами і засобами корисної загрузки БПЛА.

Вищевказані ознаки формують вихідні дані для аналізу вразливостей одиночного або групи БПЛА як стандартної віддаленої інформаційної системи (ІС) або, як зараз їх ще часто називають, кіберфізічної системи, каналом доступу до якої є КРУ. Основні уразливості БПЛА як віддаленої ІС розглянуті в роботі. На основі вразливостей системи «ПУ - БПЛА» як стандартної ІС можуть бути запропоновані наступні ІТВ:

ІТВ, засновані на порушенні доступності БПЛА або ПУ:

– ІТВ, спрямовані на порушення синхронізації і правил входження в зв'язок;

– ІТВ, спрямовані на зниження ефективності протоколів канального або мережевого рівнів радіомережі;

– ІТВ типу DOS або DDOS-атаки на вхідні порти ІС, з метою переповнення вхідного буфера;

– ІТВ на порушення нормального функціонування ПО МК, керуючих засобами зв'язку.

ІТВ, засновані на порушенні конфіденційності і цілісності зв'язку між БПЛА або ПУ:

– впровадження в КРУ помилкового ПУ з метою перехоплення управління БПЛА і нав'язування йому нових режимів польоту;

– відправка на БПЛА некоректних або різноспрямованих команд, які переводять його в аеродинамічний-нестійкий режим польоту;

– відправка на БПЛА команд «зниження» або «відключення живлення двигунів», а також інших команд, однозначно ведуть до негайного припинений польоту БПЛА;

– відправка на БПЛА команд відключення бортової апаратури корисного навантаження;

– впровадження в КРУ помилкового «віртуального» БПЛА, який надає ПУ таку неправдиву ТМИ, яка змушує ПУ формувати явно некоректні команди управління БПЛА, перетворювані останній в аеродинамічний-нестійкий режим польоту;

ІТВ засновані на порушенні цілісності і доступності ОС або ПЗ на БПЛА або ПУ:

– використання стандартних вразливостей керуючих ОС або ПЗ для формування ІТВ на них з метою блокування нормального режиму їх функціонування;

– прихований переклад апаратних засобів БПЛА в режим підвищеної витрати енергії або в аеродинамічний-нестійкий режим польоту;

– впровадження в керуючі ОС або ПЗ комп'ютерних вірусів, які створюють умови для порушення функціонування ОС і ПО або для перехоплення управління БПЛА;

– впровадження в БПЛА програмних або апаратних закладок, що реалізують несанкціоновані режими роботи або підключення до іншого «несанкціонованому ПУ» і виконання його команд з більш високим пріоритетом.

В цілому при формуванні ІТВ на БПЛА, останній розглядається як стандартна ІС. У цьому сенсі таргетована атака на ОС і ПО БПЛА фактично не відрізняється атаки будь-якої іншої віддаленої ІС. Основні типи ІТВ характерних для ІС розглянуті в роботі.

Приклади націлених ІТВ на БПЛА представлені в роботах. При цьому, особливістю ІТВ на БПЛА є те, що формуються ІТВ повинні призводити до максимально швидкого припинення польоту БПЛА до контрольованого рубежу з мінімальним збитком.

Розглядаючи питання організації ІТВ на БПЛА, необхідно визначити, що незважаючи на поширення в популярних ЗМІ великого числа повідомлень про успішне «зломі» БПЛА і перехопленні управління ними, створення такої системи

представляється вельми нетривіальним науково-технічним завданням. Організація ІТВ на БПЛА вимагає інтеграції засобів РРТР і КР в єдиний комплекс розвідки сигнальних, форматних, потокових і мережевих параметрів КРУ, що забезпечують автоматичне розтин і отримання даних про ОС і ПО, використовуваних на БПЛА і на ПУ, в дуже стислі терміни (в кращому випадку - порядку декількох десятків секунд, поки БПЛА рухається до контрольованого рубежу), ґрунтуючись на вельми обмеженому числі перехоплених пакетів з відносно повільної лінії КРУ.

Формування ІТВ зажадає інтегрування в єдиний комплекс засобів РЕП і ІТВ, які б на основі даних про сигнальних, форматних, потокових і мережевих параметрах КРУ, БПЛА та ПУ автоматично вибирали сценарії найбільш оптимальних ІТВ і потім в режимі реального часу формували таргінг атаки на елементи системи « БПЛА - ПУ », з метою якнайшвидшого припинення польоту БПЛА. Діючі повнофункціональні системи, вирішальні подібні завдання в режимі реального часу щодо БПЛА, або хоча б їх проекти, до теперішнього часу автору невідомі.

Разом з тим, в окремих проектах систем РЕП для протидії БПЛА зустрічаються технічні рішення, спрямовані на визначення факту використання одного з найбільш поширених протоколів управління комерційними малими БПЛА (MAVlink, SLT.DSM, XBee і ін.) І формування в рамках цього конкретного протоколу неправдивих команд управління БПЛА: «посадки», «зниження» і т.д.

Більш реалізованим при вирішенні завдання протидії малим комерційним БПЛА виглядає спосіб розробки спеціальних програмних закладок, впроваджуваних в керуючу ОС або ПЗ БПЛА при їх сертифікації, наприклад, для продажу і застосування на території України.

При цьому дана програмна закладка повинна передбачати прийом за стандартними радіоканалах (наприклад, Wi-Fi) і обробку з найвищому пріоритетом спеціалізованих команд заборони польоту, які можуть транслюватися «віртуальними ПУ» розміщеними на рубежах контрольованих зон. Такий захід дозволить на 90% однозначно закрити проблему протидії

комерційним малим БПЛА в зонах, де їх політ заборонений, причому без розробки дорого вартісних засобів РЕП з потенційно сумнівною ефективністю.

ВИСНОВКИ

1. Створення і широке застосування, часто несанкціоноване, БПЛА різного конструктивного виконання і ваги поставили нагальну проблему розробки ефективних технічних засобів їх оперативного виявлення і розпізнавання.

2. Інформація для виявлення і подальшої пеленгації БПЛА може бути отримана шляхом прийому спеціальними засобами відбитої і випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектру електромагнітних і акустичних хвиль. Для вирішення проблеми виявлення БПЛА в даний час використовуються канали: акустичний, оптичний, інфрачервоний і радіоканал, а також канал радіорозвідки. Для виявлення малопомітних і мало швидкісної БПЛА з відомих найбільш ефективним є акустичний канал.

3. Сумарний спектр акустичного випромінювання тактичного БПЛА обумовлений гармонійними і широкосмуговими складовими. При застосуванні акустичних систем для виявлення і розпізнавання БПЛА в даний час використовуються частотні діапазони, спектрограми, нормовані автокореляційні функції і фазові портрети прийнятих сигналів.

4. Актуальним завданням є завдання розроблення ефективних методів пеленгації БПЛА. Класичні методи пеленгації не дозволяють вирішувати завдання в умовах швидко мінливої динамічної обстановки, яка характерна для БПЛА. Вони не задовольняють запитам практики по точності вимірювань і, особливо, по кутовий роздільної здатності. Задоволення вимог може бути досягнуто використанням просторових решіток і сучасних методів просторової обробки

5. Інформаційними ознаками звукового образу БПЛА можуть служити оцінки спектральних коефіцієнтів, а також параметри моделей авто регресії.

6. Розроблено модель безпілотного літального апарату, що відрізняється від відомих тим, що БПЛА представляється як система масового обслуговування

і що в запропонованої моделі враховуються параметри швидкості переміщення БПЛА, висоти його прольоту і щільності сенсорної мережі.

Розроблено метод вибору оптимального маршруту для збору даних за допомогою БПЛА, що відрізняється від відомих тим, що для вирішення завдання комівояжера використовується модифікований метод випадкового штрафування вершин графа маршруту. Розроблено комплекс моделей впливу на літаючі сенсорні мережі навмисних електромагнітних впливів, методи виявлення і захисту від них, відрізняються від відомих тим, що для виявлення використовується аналіз параметрів функціонування наземного сегмента БСС, а захист здійснюється за рахунок реконфігурації архітектури ЛСС.

Розроблено метод ідентифікації безпілотних літальних апаратів, відрізняється від відомих використанням для цілей ідентифікації архітектури цифрових об'єктів.

Розроблено метод збору інформації за допомогою БПЛА, що відрізняється від відомого використанням для цих цілей протоколів великомасштабних маловикористованих мереж для передачі відео зображення на значні відстані, обчислювані кілометрами.

СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абукраа А. С., Вилькоцкий М. А., Лыньков Л. М. Влияние на помехоустойчивость и точность абонентских приемников спутниковых навигаторов близкорасположенных экранов с учетом условий распространения радиоволн на реальной местности // Доклады БГУИР. 2017. № 3 (105). С. 85-92.

2. Ананьев А. В., Змий Б. Ф., Кащенко Г. А. Модернизация бортовых приемо-передающих систем беспилотных летательных аппаратов на основе эволюционного подхода // Радиотехника. 2016. № 8. С. 46-49.

3. Аниськов Р. В., Архипова Е. В., Гордеев А. А., Пугачев А. Н. К вопросу борьбы с незаконным использованием беспилотных летательных аппаратов коммерческого типа // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9-10 (111-112). С. 71-75.

4. Бойко А. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // RoboTrends [Электронный ресурс], 2019. – URL: http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov (дата обращения 14.04.2020).

5. Бойко А. Blighter AUDS // RoboTrends [Электронный ресурс], 2015. – URL: http://robotrends.ru/pub/1542/bespilotnik-v-polete-ostanovit-blighter-auds (дата обращения 14.04.2020).

6. Бочмага Д. А., Шимон Н. С., Калач А. В., Калач Е. В., Урусова Т. Е. Проблемы противодействия БПЛА в учреждениях ФСИН России // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 89-91.

7. Боев Н. М., Шаршавин П. В., Нигруца И. В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 147-158.

8. Верба В. С., Меркулов В. И., Миляков Д. А. Проблемы управления большими плотными группами беспилотных летательных аппаратов //

Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 6. С. 3-13.

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

10. Гэн К., Чулин Н. А. Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей // Машиностроение и компьютерные технологии. 2016. № 12. С. 182-206.

11. Гончаренко И.А. Антенны КВ и УКВ. Часть 3. Простые КВ антенны. М.: РадиоСофт, 2015. 288 с.

12. Гришин В. А. Системы технического зрения в решении задач управления беспилотными летательными аппаратами // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 46-52.

13. Демьянович М. А. Использование беспилотных летательных аппаратов в преступных целях: методы противодействия и борьбы // Правопорядок: история, теория, практика. 2019. № 2 (21). С. 108-112.

14. Жук А. П., Орел Д. В. Об оценке помехозащищенности спутниковых радионавигационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2012. Т. 10. № 2. С. 83-88.

15. Журавлев А. В., Безмага В. М., Красов Е. М., Смолин А. В., Шуваев В. А., Маркин В. Г. Устройство для пространственной селекции сигналов навигационных космических аппаратов с использованием пеленгования источников радиопомех // Патент RU 2 619 800 C1 от 18.05.20

16. Какие существуют дроны и на каких частотах они работают? // Podavitel.ru [Электронный ресурс], 2020. – URL: http://www.podavitel.ru/na-kakikh-chastotakh-rabotayut-kvadrokoptery-i-drony.html (дата обращения 14.04.2020).

17. Комплекс радиоэлектронной борьбы с БПЛА «Шиповник-АЭРО» // RuFor.org [Электронный ресурс], 18.06.2015. – URL: https://rufor.org/showthread.php?t=29323 (дата обращения 14.04.2020).

18. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения //

19. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). – URL: http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/ (дата доступа 16.10.2019).

20. Пантенков Д. Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем при воздействии преднамеренных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 57-68.

21. Рябко Б.Я., Фионов А.Н., Шокин Ю.И. Криптография и стеганография в информационных технологиях. Новосибирск: Наука, 2015. 240 с.

22. Системы обнаружения БЛА. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://antidron.pro/katalog/obnaruzhenie-bespilotnikov-sled (дата обращения 27.08.2019).

23. Система обнаружения беспилотных летательных аппаратов. [Электронный ресурс]. Режим доступа. https://www.2test.ru/solutions/importozameshchenie/sistemy-monitoringa-ibezopasnosti/sistema-obnaruzheniya-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov.html (дата обращения 27.08.2019).

24. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, Изд. 2- е, испр.: Пер. с англ. / Б. Скляр. М.: Издательский дом „Вильямс”, 2003. 1104 с.

25. Угода зі стандартизації (STANAG 5048). Мінімальний рівень інтеграції систем зв'язку та інформатизації сухопутних військ НАТО.

26. Федоров Е. Война с дронами. Саудовский голиаф против хуситов // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 28.09.2019. – URL: https://topwar.ru/162842-vojna-s-dronami-saudovskij-goliaf-protiv-husitov.html (дата обращения 14.04.2020).

27. Щербинин В. В., Свиязов 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.

28. Явіся В.С. Спосіб забезпечення високошвидкісної передачі даних безпілотними літальними апаратами // Одинадцята міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій". Матеріали конференції. – К.: КПІ ім. І. Сікорського. 2017. С. 362 – 365.

29. Явіся В.С., Вакуленко О.В. Особливості побудови телекомунікаційних мереж на базі БПЛА для передачі інформації на великі відстані // IX Науково-практична конференція „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО". Збірник тез. – К.: ВІТІ. 2016. С. 208 – 209.

30. Ясечко М. Н., Очкуренко А. В., Ковальчук А. А., Максюта Д. В. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2015. № 3 (44). С. 54-57.

31. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.

32. Bruwer F. J., Smit W., Kuhn G. J. Microchips and remote control devices comprising same. 1996. US patent 5517187, issued 1996-05-14.

33. Indesteege S., Keller N., Dunkelman O., Biham E., Preneel B. A practical attack on KeeLoq // Smart N. (eds) Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2008. Springer, 2008. Lecture Notes in Computer Science. V. 4965. P. 1–18.

34. Courtois N.T., Bard G.V., Wagner D. (2008) Algebraic and slide attacks on KeeLoq // . In: Nyberg K. (eds) Fast Software Encryption. FSE 2008. Springer, 2008. Lecture Notes in Computer Science. V. 5086. P. 97–115.

35. Khan A. Hacking the Drones // Open Web Application Security Project [Электронный ресурс]. 2016. – URL: https://owasp.org/www-chapter-london/assets/slides/OWASP201604_Drones.pdf (дата доступа 20.04.2020).

36. Rodday N. Hacking a Professional Drone // Black Hat Asia 2016 [Электронный ресурс]. 2016. – URL: https://www.blackhat.com/docs/asia-16/materials/asia-16-Rodday-Hacking-A-Professional-Drone.pdf (дата доступа 20.04.2020).

37. Petrovsky O. Attack on the drones: security vulnerabilities of unmanned aerial vehicles // 25th Virus Bulletin International Conference [Электронный ресурс]. 2015. – URL: https://www.virusbulletin.com/conference/vb2015/abstracts/attack-drones-security-vulnerabilities-unmanned-aerial-vehicles (дата доступа 20.04.2020).

38. Here’s how easy it is to hack a drone and crash it // Futurity [Электронный ресурс]. 08.06.2016. – URL: https://www.futurity.org/drones-hackers-security-1179402-2/ (дата доступа 20.04.2020).

39. Wang H., Zhao H., Zhang J., Ma D., Li J., Wei J. Survey on unmanned aerial vehicle networks: A cyber physical system perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Т. 22. № 2. С. 1027-1070. DOI: 10.1109/COMST.2019.2962207.

40. Whyte S. Analysis of RF remote security using software defined radio. Carleton University: COMP 4905: Honours Project. 2013. 65 p.

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА
ALMA MATER
NOMEN EST OMEN
ІМ'Я ЗОБОВ'ЯЗУЄ