

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

Черепніна Гліба Сергійовича

на тему «Виявлення безпілотних літальних апаратів на тлі неба за їх

радіотепловим випромінюванням»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації, спеціальність

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

### **Актуальність теми дисертації.**

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають широке призначення та використовуються у багатьох областях, включаючи як цивільну та наукову, так і військову. Незалежно від сфери застосування, широке використання малих БПЛА породило низку проблем, пов'язаних з протиправними діями власників (або операторів) БПЛА, несанкціонованим моніторингом об'єктів та територій державної важливості, почастишали випадки вторгнення в особисте життя, а також з можливістю використання БПЛА у військових діях, терористичних та розвідувальних цілях. Зокрема, повітряна розвідка із застосуванням БПЛА є пріоритетним фактором, що визначає ефективність бойових дій угруповань збройних сил. Крім того, БПЛА вирішують наступні основні завдання: ведення спостереження (розвідки), завдання ударів по наземних/надводних цілях, транспортування вантажів, вказівка (коригування) цілей для інших засобів ураження, ретрансляція даних між віддаленими абонентами мереж зв'язку. Таким чином, на сьогоднішній день БПЛА посіли міцне місце у системі озброєння різних країн. Розвиток таких систем підштовхує, у свою чергу, до розширення засобів боротьби з БПЛА з метою протидії противнику. Високий попит на надійні рішення щодо протидії БПЛА наразі є світовим трендом. Так, за даними Global Market Insights Inc, світовий ринок протидронних рішень був оцінений у 1,9 мільярда доларів США в 2023 році і зростатиме більш ніж на 26% з 2024 по 2032 рік.

Головними проблемами для ППО є малопомітність БПЛА, дешевизна їх виробництва та багатозадачність. Відповідно, найголовнішим завданням є синтез ефективних систем виявлення БПЛА. На даний час цей напрямок наукових досліджень розвивається досить активно. Виявлення та подальше розпізнавання (класифікація) БПЛА може здійснюватися з використанням різних фізичних принципів – як активних, так і пасивних способів виявлення, а

також їх комбінацій. При цьому інформація для виявлення БПЛА може бути отримана шляхом прийому спеціальними засобами відбитої та / або випромінюваної енергії у всіх діапазонах спектра електромагнітних та акустичних хвиль. Отже, розроблення методу виявлення БПЛА за їх радіотепловим випромінюванням (РТВ) є важливим завданням, на вирішення якого і спрямовано дисертаційну роботу Черепніна Г. С.

Таким чином, тематика дисертаційної роботи є *актуальною*.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Розроблені автором і викладені у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації мають достатній рівень обґрунтованості. Дисертантом опрацьовано і проаналізовано значну кількість літературних джерел як вітчизняних, так і зарубіжних вчених, фахівців у галузях статистичної теорії синтезу радіотехнічних систем, теорії оптимальних рішень та радіотеплолокації. Результати виконаних досліджень спираються на відомі досягнення у предметній галузі та не суперечать теоретичним закономірностям, відомим фактам та загально прийнятим уявленням про причини виникнення радіотеплових контрастів БПЛА на тлі неба та принципи оброблення РТВ у пасивних системах. В процесі дослідження застосовано загальнонаукові та спеціальні прийоми і методи пізнання; їх використання дозволило дисертанту науково обґрунтувати теоретичні, методологічні та практичні аспекти формування та застосування розробленого метода виявлення БПЛА за їх радіотепловим випромінюванням.

Висновки та рекомендації здобувача є логічними і витікають із результатів об'єктивного аналізу результатів, отриманих експериментально – як шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання кривих виявлення БПЛА, так і експериментальними дослідженнями радіотеплових контрастів різних типів БПЛА за допомогою вимірювального пасивного комплексу із залученням сучасного вимірювального обладнання та елементної бази.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів дисертації підтверджено їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях, праці яких індексуються у н.м.б.д. Scopus. Також деякі наукові результати здобувача були перевірені в рамках НДР «Проектування та експериментальне дослідження радіометричного комплексу X, Ka та W діапазонів для всепогодного та високоточного виявлення БПЛА» (№ДР

0121U109600, 2021-2022 р.р.), що виконувалася на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Наукова новизна результатів, отриманих у роботі, полягає у наступному:

– **Вперше** синтезовано та досліджено метод оптимальної обробки сигналів у багаточастотних радіометричних комплексах виявлення БПЛА на тлі випромінювання атмосфери, що на відміну від існуючих методів відповідає основним вимогам до радіотехнічних вимірювань – високій просторовій роздільній здатності та високій флуктуаційній чутливості (яка визначає дальність роботи радару) за умов всепогодності.

– **Вперше** узагальнено результати аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання дальностей виявлення БПЛА в багатоканальних радіометричних комплексах, що на відміну від існуючих охоплюють широке коло можливих погодних та тактичних умов проведення вимірювання, а також враховують багаторічні результати вимірювань параметрів приймачів та атмосфери у діапазонах частот 10–12 ГГц, 20–22 ГГц, 35–36 ГГц, 94–96 ГГц.

– **Вперше** в результаті експериментальних вимірювань у широкому діапазоні довжин хвиль отримана база радіометричних зображень і контрастів різних типів та класів БПЛА, які спостерігаються при різних тактичних та погодних умовах. До цього більшість вимірювань проводились на тестових об'єктах простої форми, на кшталт куля, кутковий відбивач, прямокутна пластинка.

– **Отримали подальшого розвитку** структури радіометричних комплексів формування радіометричних зображень, що на відміну від існуючих на основних етапах оброблення враховують операції модуляції корисних сигналів, періодичне калібрування приймачів та термостабілізацію вхідних трактів одразу у чотирьох діапазонах частот.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання з розробки методу виявлення БПЛА за їх радіотепловим випромінюванням на тлі неба, що дозволяє підвищити ймовірність виявлення БПЛА в будь-яких погодних та тактичних умовах, та апробації розробленого метода шляхом експериментального дослідження макету радіометричного комплексу X, Ka та W діапазонів хвиль виконано повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.



**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Черепніна Г. С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Телекомунікації та радіотехніка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям 17 Електроніка та телекомунікації.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Черепніна Гліба Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак порушення принципів академічної доброчесності.

#### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Розділи та підрозділи мають логічну структуру, а матеріал викладено послідовно з дотриманням наукового стилю та загальноприйнятої фахової та загальнонаукової термінології. У роботі досягнуті тематична повнота та повне розкриття головних наукових ідей здобувача.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації 200 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, зазначено, в чому полягають наукова новизна та практична значимість отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**Перший** розділ роботи присвячений огляду сучасних методів та систем виявлення та протидії БПЛА, наведено їх переваги і недоліки. Розглянуто різноманітні схеми побудови радіометричних систем та наведено теоретичні

основи синтезу оптимальних методів обробки сигналів РТВ. Сформульовано перелік завдань, які необхідно вирішити у дослідженні.

У другому розділі наведено теоретичні основи побудови багаточастотних радіометричних систем виявлення БПЛА. Оскільки система повинна працювати за будь-яких погодних умов, здобувачем запропоновано використовувати декілька частотних діапазонів. Комплексування отриманої інформації з урахуванням характеристик приймачів і поточного стану атмосфери дозволить зменшити невизначеність стосовно наявності БПЛА. Описано оптимальний алгоритм виявлення, що дозволяє поєднувати результати оцінок яскравісної температури БПЛА у 4-х частотних діапазонах. На основі статистичної теорії оптимізації радіосистем визначено ймовірнісні характеристики алгоритму роботи радіометричного комплексу.

У третьому розділі описано методологію проведення експериментів з визначення радіотеплових контрастів різних типів БПЛА. Наведено детальні відомості щодо використаної апаратури та показано результати вимірювань, а саме частотні та кутові залежності величин радіотеплових контрастів різних типів БПЛА на тлі неба при різних атмосферних явищах (хмарність, дощ).

У четвертому розділі на основі розробленого алгоритму запропоновано загальну структурну схему радіометричного комплексу та виконано її опис. Розраховано потенційні можливості запропонованої системи. Надано рекомендації щодо практичного вибору порогу виявлення БПЛА для забезпечення заданої ймовірності правильного виявлення для різних кутів спостереження, станів атмосфери, розмірів та матеріалу виготовлення БПЛА.

У висновках стисло сформульовано основні результати дисертаційного дослідження та надано пропозиції стосовно їх практичного застосування із метою вирішення поставлених задач.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Основні результати дослідження опубліковано у 6-ти наукових публікаціях здобувача (3 статті – у наукових фахових виданнях України, 2 статті – у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у м.н.б.д. Scopus, квартиль Q3, одна стаття – у виданні, що входить до м.н.б.д. Scopus, квартиль Q2). Також здобувач має 1 патент України на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосується наукових результатів дисертації.

Результати дисертації також було апробовано на 2-х міжнародних наукових фахових конференціях, а саме:

- 6th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET, 2022.
- 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week, UkrMW, 2022.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлено у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. У математичних моделях сигналів, використаних при розробленні алгоритмів обробки РТВ, доцільно було б враховувати швидкість руху БПЛА, який накладає обмеження на час спостереження.

2. Доцільно було вказати, які саме наближення були використані при проведенні експериментів та розрахунків та які фактори вважалися незначимими при вирішенні задачі виявлення БПЛА. Зокрема, недостатньо досліджено як на ймовірність виявлення БПЛА за радіотепловим контрастом впливає змінення ракурсу об'єкта спостереження, температура навколишнього середовища (пора року) тощо.

3. В четвертому розділі запропоновано структуру перспективної системи виявлення БПЛА, що використовує частотні діапазони X, Ku, Ka, W, проте не проаналізована інформативність даних, отримуваних з цих каналів. Тож не зрозуміло, чи дійсно варто залишати усі чотири канали.

4. Не наведено вимог до технічних характеристик антени, зокрема ширини головної пелюстки, рівня максимальної бічної пелюстки, граничного значення власного теплового шуму антени.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Черепніна Гліба Сергійовича на тему «Виявлення безпілотних літальних апаратів на тлі неба за їх радіотепловим випромінюванням» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для




галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Черепнін Гліб Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

**Рецензент:**

Доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій ім. О. О. Зеленського  
Національного аерокосмічного  
університету ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»,  
кандидат технічних наук, доцент

 Ірина ВАСИЛЬЄВА

Підпис доцента Васильєвої Ірини Карлівни засвідчую

Вчений секретар  
Національного аерокосмічного  
університету ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»,  
кандидат технічних наук, доцент



Тетяна БОНДАРЄВА