

## **РЕЦЕНЗІЯ**

**рецензента, д.т.н., професора Кучук Ніни Георгіївни**

на дисертаційну роботу Чжана Мінцзяна

«Метод підвищення кібербезпеки безпілотних літальних апаратів із  
вбудованою системою ADS-B»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія

### **1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Проблема безпеки безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які активно впроваджуються у транспортну, комерційну та оборонну сфери, наразі має ключове значення. Особливо критичними є вразливості, що виникають через відкриту структуру системи ADS-B, яка не передбачає ані шифрування, ані автентифікації. Саме тому тема підвищення кібербезпеки БПЛА через розробку методів прихованого вбудовування ідентифікаційних даних у сигнали ADS-B є надзвичайно актуальною.

### **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота відповідає планам науково-дослідних робіт кафедри «Комп'ютерна інженерія та програмування» в рамках держбюджетної теми МОН України: «Дослідження методів контролю та захисту інформації в комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних та розподілених системах» (ДР № 0119U002603), у рамках якої здобувач брав участь у виконанні окремих етапів.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів**

До основних наукових новацій дисертації слід віднести:

1) вперше розроблено математичну модель процесу стеганографічного вбудовування ідентифікатора БПЛА в дані формату ADS-B. Модель базується на китайській теоремі про остачі та теоремі про кінцеве цілісне кільце. Комплексна математична формалізація дозволила оцінити

еквівалентні  $W$ -функції часу стеганографічного кодування та декодування ідентифікаторів БПЛА із вбудованою системою ADS-B.

2) вперше розроблено метод стеганографічного вбудовування ідентифікаторів в дані формату ADS-B з використанням перетворення Фур'є. Відмінною особливістю розробленого методу є комплексне використання алгоритмів адаптивної модифікації спектральних компонентів сигналу для зменшення спотворень даних формату ADS-B. Це дозволило до 4 разів підвищити рівень скритності вбудованої інформації.

3) вдосконалено спосіб адаптивного вибору спектральних компонентів сигналу ADS-B для вбудовування ідентифікатора, який відрізняється від відомих динамічним регулюванням амплітуди вбудовування у кожному фрагменті сигналу. Це дозволило зменшити ймовірність помилок розпізнавання прихованої інформації до 2 разів.

#### **4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання**

Результати роботи мають як теоретичну, так і прикладну цінність. Розроблений метод дозволяє істотно підвищити стійкість БПЛА до типових атак: підміна, спуфінг, вставка повідомлень. Практична цінність підтверджена реалізацією методу на SDR-платформі з високими показниками ефективності та мінімальним спотворенням сигналу.

Рекомендовано для впровадження в авіаційні системи пасивного моніторингу та в концепції "цифрового неба" та Smart City.

#### **5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором**

Результати дослідження оприлюднені у 7 наукових публікаціях, з яких 4 – у фахових або міжнародних рецензованих виданнях, включених до Scopus та Web of Science. У співавторських роботах автор чітко визначає власний внесок, що відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня PhD.

## **6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Дисертація має чітку структуру, яка включає вступ, чотири розділи, висновки, список джерел та додатки. Розділи логічно пов'язані між собою. Вступ коректно окреслює мету та завдання. Кожний розділ завершується висновками, що свідчить про методичну дисципліну автора.

У дисертації детально обґрунтовано доцільність застосування спектрального стеганографічного підходу до вбудовування ідентифікаторів у повідомлення ADS-B. Створено формалізовану математичну модель процесу на основі китайської теореми про остачі, що дозволяє аналітично оцінити часові характеристики кодування/декодування.

Обґрунтування побудоване на базі аналізу літератури, формалізації моделей, чисельного моделювання, а також практичних експериментів. Усі висновки підтверджені кількісними показниками: BER, NMSE, MD, AD.

## **8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Порушень академічної доброчесності не виявлено. Усі використані джерела наведені у списку літератури. Авторські положення підтверджено результатами, опублікованими в наукових статтях. Плагіат відсутній.

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

1) У розділі щодо криптозахисту доцільно було б ширше порівняти запропонований метод з існуючими криптографічними підходами (наприклад, UAT, Mode S Extended Squitter).

2) В розділі з адаптивним вибором спектральних компонентів бракує аналізу обчислювальної складності алгоритму для реального часу.

3) Порівняльний аналіз із сучасними криптографічними методами захисту ADS-B варто було б розширити. Зокрема, не розглянуто потенціал комбінування стеганографічного підходу з методами автентифікації або

підпису повідомлень, що вже випробовуються в рамках міжнародних ініціатив.

4) Алгоритмічна частина адаптивного вибору частот потребує детальнішої оцінки з позиції продуктивності. Особливо це стосується виконання на вбудованих процесорах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

5) Не приділено належної уваги впливу зовнішніх радіоперешкод різної природи на надійність прихованої передачі. Було б доцільно представити результати для кількох сценаріїв завад (наприклад, вузькосмугові vs широкосмугові сигнали шуму).

## 10. Висновок

Дисертаційна робота Чжана Міньцзяна «Метод підвищення кібербезпеки безпілотних літальних апаратів із вбудованою системою ADS-B» є завершеним науковим дослідженням, що має як теоретичну глибину, так і прикладне значення. Робота відповідає критеріям, встановленим для дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія.

Рецензент, професор кафедри  
комп'ютерної інженерії та  
програмування НТУ «ХП»,  
доктор технічних наук, професор

*Посада, науковий ступінь, вчене звання*

Ніна КУЧУК

«07» серпня 2025 р

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"  
підпис *Ніна Кучук*  
Засвідчую: *Галина Кочуб*  
Начальник відділу кадрів

