

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора, професора кафедри кібербезпеки та захисту інформації факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Наконечного Володимира Сергійовича на дисертаційну роботу
Бондарева Олександра Сергійовича

на тему «Методи підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем»
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

1. Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Бондарева Олександра Сергійовича присвячена актуальному науково-прикладному завданню підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем. Обрана тема є важливою для сучасної телекомунікаційної галузі, систем радіонавігації, кіберфізичних систем та засобів забезпечення стійкості безпілотних авіаційних систем та комплексів у складному радіоелектронному середовищі.

У сучасних умовах безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) дедалі ширше застосовуються для моніторингу, розвідки, логістики, спостереження за об'єктами критичної інфраструктури, пошуково-рятувальних завдань та виконання місій за межами прямої видимості, що є особливо актуальним в умовах воєнних дій. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від надійності каналів супутникового зв'язку, точності навігації, актуальності навігаційної інформації та здатності системи керування зберігати працездатність за умов зовнішніх впливів.

Особливої значущості дослідження набуває з позиції кібербезпеки та захисту інформації. GNSS spoofing, GNSS jamming, деградація каналів зв'язку, навмисне нав'язування хибних координат або порушення цілісності навігаційних даних можуть призвести до втрати достовірності інформації про місцезнаходження, відхилення БпАК від маршруту, погіршення якості керування або втрати керованості. Тому питання своєчасного виявлення підміни координат і забезпечення переходу до резервних навігаційних режимів має не лише технічне, а й безпекове значення.

Актуальність роботи також визначається тим, що наявні підходи часто розглядають супутниковий зв'язок, GNSS-навігацію, інерціальні навігаційні системи, фільтрацію даних і керування БпАК окремо. Така фрагментарність ускладнює комплексну оцінку впливу затримок, варіативності у часі між сигналами або пакетами даних, втрат пакетів, доступності каналу, повторних передач, актуальності навігаційних даних та похибки позиціонування на стійкість функціонування БпАК.

У цьому контексті розроблення комплексної моделі оцінки ефективності системи, а також методів виявлення та нівелювання впливу підміни координат є своєчасним і відповідає сучасним потребам розвитку телекомунікаційних, навігаційних та кіберфізичних систем.

2. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукові результати, подані в дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими, логічно структурованими та такими, що відповідають поставленій меті дослідження. Автор послідовно аналізує проблему функціонування каналів супутникового зв'язку та навігації для БпАК, визначає основні чинники, що впливають на ефективність комунікаційно-навігаційної системи, та формує підходи до її комплексного оцінювання.

Позитивним є те, що в роботі враховано взаємний вплив телекомунікаційних і навігаційних параметрів. Зокрема, параметри якості зв'язку розглядаються не ізольовано, а з урахуванням їхнього впливу на актуальність навігаційної інформації, частоту коректних оновлень навігаційного фільтра, похибку позиціонування, запас стійкості та ризик втрати керованості БпАК.

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням методів теорії телекомунікаційних систем, системного аналізу, математичного та імітаційного моделювання, теорії ймовірностей, методів оптимізації та сценарного аналізу. Застосування цих методів дає змогу оцінювати поведінку системи в різних умовах функціонування.

Окремо слід відзначити спрямованість роботи на вирішення питань навігаційної безпеки. Запропоновані підходи до виявлення GNSS spoofing, формування інтегрального індикатора підозри та автоматичного переходу до режиму INS HOLD мають прикладне значення для підвищення довіри до навігаційних даних і захисту системи керування від використання нелегітимної інформації.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в одержанні нових і вдосконаленні наявних наукових положень щодо підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем.

У дисертаційній роботі отримано такі основні наукові результати:

1. Вперше розроблено комплексну модель оцінки ефективності системи зв'язку та навігації БпАК, яка враховує параметри якості зв'язку, зокрема затримку, джитер, втрати пакетів, доступність каналу та повторні передачі, а також їх вплив на динамічну точність навігації, актуальність навігаційних даних і ризик втрати навігації.

2. Вперше розроблено метод виявлення та нівелювання впливу підміни координат на якість визначення місцезнаходження в умовах зовнішнього впливу завад, що передбачає покрокове опрацювання координат, збір допоміжної інформації, виявлення аномалій та активну перевірку достовірності навігаційних даних.

3. Удосконалено метод перемикання на інерціальну систему навігації за рахунок оперативного виявлення підміни координат і вибору оптимальної INS-системи з урахуванням цільової ефективності, обчислювальної складності реалізації та наявних ресурсних обмежень.

Наведені результати мають належний рівень наукової новизни та свідчать про самостійний внесок здобувача у розв'язання поставленого науково-прикладного завдання. Особливо важливим є те, що робота поєднує телекомунікаційний, навігаційний та безпековий аспекти функціонування БпАК у єдиній системі оцінювання.

4. Мова та стиль викладення дисертації

Дисертаційна робота написана українською мовою з дотриманням основних вимог наукового стилю. Матеріал викладено послідовно, логічно та аргументовано. Автор коректно використовує фахову термінологію у сфері супутникового зв'язку, GNSS-навігації, інерціальних навігаційних систем, телекомунікаційних каналів, радіоелектронних завад, кіберфізичних систем і математичного моделювання.

Наведені в роботі таблиці, рисунки, блок-схеми, моделі та алгоритмічні описи сприяють кращому розумінню основних положень дисертації. Стиль

викладення загалом відповідає вимогам, що ставляться до дисертаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

5. Загальна структура та зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота має логічну структуру, яка забезпечує послідовне розкриття теми дослідження. Побудова роботи відповідає поставленій меті та завданням і дозволяє простежити перехід від аналізу сучасного стану проблеми до розроблення моделей, методів, алгоритмів і програмних засобів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача та інформацію про апробацію результатів.

У першому розділі проведено дослідження ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для військових безпілотних авіаційних систем. Розглянуто технології та провайдерів супутникового зв'язку, вимоги до каналів зв'язку та навігаційних систем, стійкість до радіоелектронної боротьби, альтернативні методи навігації та приклади реалізації таких технологій у сучасних БпАК.

У другому розділі здійснено формалізацію архітектури супутникової комунікаційно-навігаційної системи. Автор розглядає модель супутникових каналів зв'язку та навігації, імовірнісну модель надійності супутникового каналу, оцінювання втрат пакетів, завад, точності супутникової навігації та впливу радіоелектронної боротьби. Важливим є формування спільного критерію «зв'язок — навігація» для оцінки ефективності системи.

У третьому розділі запропоновано методи підвищення ефективності функціонування системи супутникової навігації для БпАК. Розглянуто методи виявлення та протидії GNSS spoofing, інтегрований метод із автоматичним перемиканням на інерціальну навігацію, алгоритм вибору оптимальної INS-системи та оцінку обчислювальної складності методу виявлення GNSS-спуфінгу.

У четвертому розділі наведено реалізацію та оцінку ефективності розроблених методів і моделей. Описано вебзастосунок для оцінки ефективності функціонування системи зв'язку та навігації для БпАК, проведено аналіз розроблених методів і показано можливість їх практичного використання.

Загалом структура роботи є цілісною, а зміст дисертації відповідає її темі та поставленим завданням. Дисертація справляє враження завершеного самостійного наукового дослідження.

6. Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в можливості використання отриманих результатів під час розроблення, моделювання, модернізації та оцінювання комунікаційно-навігаційних систем безпілотних авіаційних комплексів.

Розроблена комплексна модель оцінки ефективності системи зв'язку та навігації БпАК може бути використана для аналізу впливу параметрів каналу зв'язку на точність навігації, актуальність навігаційних даних, якість керування та ризик втрати керованості. Це створює передумови для більш обґрунтованого вибору параметрів супутникового зв'язку, навігації та керування в різних сценаріях застосування.

Запропонований метод виявлення та нівелювання впливу підміни координат має практичну цінність для підвищення захищеності БпАК від GNSS spoofing та інших навмисних впливів на навігаційні сигнали. Перехід на INS HOLD після виявлення підміни координат дозволяє зменшити вплив нелегітимних GNSS-даних на систему позиціонування та керування.

Важливим практичним результатом є розроблення вебзастосунку для комплексної оцінки ефективності системи зв'язку та навігації БпАК. Такий інструмент може використовуватися для сценарного моделювання, підтримки прийняття рішень і формування рекомендацій щодо покращення параметрів системи.

Одержані результати можуть бути корисними для розробників БпАК, систем супутникової навігації, засобів захисту навігаційної інформації, програмного забезпечення підтримки прийняття рішень, а також для подальших наукових досліджень у сфері телекомунікацій, навігації та кібербезпеки кіберфізичних систем.

7. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні результати дисертаційної роботи достатньою мірою оприлюднені у наукових публікаціях та доповідях на наукових і науково-практичних конференціях. За тематикою дисертаційного дослідження опубліковано праці, у яких відображено результати, що стосуються аналізу систем зв'язку для безпілотних авіаційних комплексів, оцінювання QoS-показників авіаційних комунікаційних систем, моделювання маршрутів, оброблення даних та побудови математичних моделей.

Таким чином, наведена апробація свідчить про представлення результатів дослідження у фаховому середовищі та підтверджує їх відповідність науковому напрямку дисертаційної роботи.

8. Зауваження по дисертаційній роботі

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу Бондарева О.С., доцільно висловити окремі зауваження та побажання:

1. У роботі доцільно було б більш детально формалізувати модель загроз для GNSS spoofing та GNSS jamming, зокрема чіткіше описати припущення щодо можливостей порушника, тривалості впливу, інтенсивності сигналу та умов, за яких атака вважається успішною.

2. Запропонований інтегральний індикатор підозри на GNSS spoofing є важливим результатом, однак доцільно було б ширше обґрунтувати вибір порогових значень і вагових коефіцієнтів для різних сценаріїв застосування БпАК.

3. У роботі варто було б детальніше розглянути ризики накопичення похибки інерціальної навігації при тривалому використанні резервного режиму та визначити граничні умови його безпечного застосування.

4. Розроблений вебзастосунок має прикладну цінність, проте роботу можна було б посилити окремим описом вимог до захисту даних, автентичності вхідних параметрів і цілісності результатів моделювання, що є важливим з позиції кібербезпеки.

5. Доцільно було б ширше порівняти запропоновані методи з наявними підходами до виявлення підміни GNSS-сигналів та інтеграції GNSS/INS, зокрема за показниками хибнопозитивних і хибнонегативних спрацювань.

Зазначені зауваження мають рекомендаційний характер, не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи та можуть бути враховані автором у подальших дослідженнях.

9. Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Бондарева Олександра Сергійовича на тему «Методи підвищення ефективності використання каналів супутникового зв'язку та навігації для безпілотних авіаційних систем» є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності функціонування комунікаційно-навігаційних систем безпілотних авіаційних комплексів в умовах деградації супутникового зв'язку, навігаційних завад і загроз підміни координат.

Одержані автором результати мають наукову новизну, теоретичне значення та практичну цінність. Робота є важливою з позиції розвитку телекомунікаційних і навігаційних систем, а також забезпечення кіберстійкості безпілотних авіаційних комплексів як кіберфізичних систем, у яких достовірність навігаційної інформації, захищеність каналів зв'язку та стійкість керування мають визначальне значення.

Враховуючи актуальність, наукову новизну, важливість отриманих результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також практичну значущість сформульованих положень і висновків, можна стверджувати, що представлена дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пунктів 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 № 44 (зі змінами) та вимогам до оформлення дисертації, що затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40.

Таким чином, вважаю, що за актуальністю, змістом, рівнем обґрунтованості, науковою новизною та практичним значенням дисертаційна робота відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор, Бондарев Олександр Сергійович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 "Телекомунікації та радіотехніки".

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри
кібербезпеки та захисту інформації,
факультету інформаційних технологій,
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

Володимир НАКОНЕЧНИЙ

Володимир Наконечний В.С.
заступник



ПРОРЕКТОР
З НАУКОВОЇ РОБОТИ
ОКСАНА ЖИЛІНСЬКА