ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію ***Цюпака Дмитра Олеговича*** *«Аналіз взаємодії електромагнітного випромінювання з рухомим БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія*

Актуальність теми дисертації

Початок XXI сторіччя ознаменовано бурхливим вибухоподібним розвитком і вдосконаленням технологій створення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) найрізноманітнішого призначення. Крім традиційного застосування для розв'язання різних важливих і складних задач як у військовій, так і у цивільній сфері, БПЛА швидко увійшли навіть до звичайного життя пересічних громадян. Так, наприклад, широко рекламуються у засобах масової інформації спроби застосування БПЛА для оперативної доставки замовнику поштових відправлень, зокрема, від інтернет-магазинів. Особливо такі послуги набувають величезної популярності через пандемію Covid-19.

Отже, задача створення нових і вдосконалення існуючих технічних засобів контроля застосування БПЛА вже стала вкрай важливою не тільки у військовій сфері, а й у сфері цивільного життя.

Функціонування відповідних технічних засобів ґрунтується на використанні різноманітних фізичних явищ і процесів. Саме тут відбувається поєднання чисто прикладних розробок, що створюються, зокрема, у галузі акустичної локації, дистанційного зондування, радіотехніки, радіолокації, дистанційного радіозондування і т. ін., з фундаментальними фізичними дослідженнями, які пов'язані з різними напрямками сучасної фізики, зокрема, з радіофізикою, геофізикою і т. ін. Побудова таких взаємозв'язків має величезне практичне значення.

Одним з найпоширеніших типів БПЛА є БПЛА мультироторного типу. У різних країнах світового співтовариства для розв'язання задач виявлення та розпізнавання таких БПЛА використовуються різноманітні засоби як пасивної, так і активної локації. Створення нових і вдосконалення існуючих відповідних методів аналізу відбитих від БПЛА сигналів є вкрай важливим.

Саме в такому напрямку й працює автор представленої дисертаційної роботи.

Дану роботу присвячено розв'язанню ***важливої науково-прикладної задачі,*** що полягає у розробці методів аналізу взаємодії електромагнітних хвиль з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами доплерівського сигналу (ДС) і кінематичними параметрами БПЛА.

Автор дисертації має ***на меті*** визначення нових ознак розпізнавання

БПЛА мультироторного типу за рахунок виявлення особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання радіолокаційної станції (РЛС) з обертовими роторами БПЛА з використанням методів нелінійної динаміки та монофрактального аналізу.

Задля досягнення поставленої мети необхідно розв'язати низку ***задач***, пов'язаних з:

- проведенням аналітичного огляду вже існуючих методів дослідження електромагнітних сигналів, що відбиваються від рухомого БПЛА;
- експериментальним дослідженням доплерівських сигналів, що відбиваються від обертових роторів як нерухомого, так і рухомого БПЛА;
- оцінкою часо-частотних характеристик сигналів доплерівської РЛС, відбитих від БПЛА, та пошук залежності цих характеристик від наявної кількості роторів та швидкості їх обертання;
- створенням адекватної моделі доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА;
- розробкою нових методів аналізу тонкої структури сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, що базуються на останніх досягненнях сучасної фізики у галузі нелінійної динаміки та фрактального аналізу;
- створенням методики розпізнавання типу рухомого БПЛА з використанням нових ознак розпізнавання, які ґрунтуються на числових характеристиках з арсеналу сучасних нелінійної динаміки та фрактального аналізу;
- оцінкою можливості реальної практичної реалізації запропонованих методів розпізнавання БПЛА мультироторного типу.

Тема дисертації пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки, визначеними Верховною Радою України. Результати дисертації отримано в 2013 – 2020 рр. у рамках виконання *2 науково-дослідних робіт*, в яких автор брав участь.

Таким чином, низка окремих наукових і науково-практичних задач, розв'язаних автором дисертації, у сукупності дійсно утворює важливу задачу, що полягає у розробці методів аналізу взаємодії електромагнітних хвиль з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА. Хоча, на мою думку, представлені дослідження виконано практично на межі між фізикою та радіолокацією, основна ідея роботи, безперечно, перебуває у межах нелінійної динаміки та фрактального аналізу. Останнє дозволяє класифікувати розв'язану автором науково-практичну задачу саме як важливу й актуальну задачу сучасної фізики.

Отже, **актуальність** теми досліджень, проведених у дисертації Д. О. Цюпака, не викликає жодних сумнівів.

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, їхньої достовірності та новизни

Наукові результати, висновки та рекомендації, що отримано в роботі, не

суперечать загальновідомим положенням сучасної фізики. Достовірність отриманих результатів зумовлена застосуванням комплексу сучасних методів дослідження та методик обробки результатів. Вона підтверджується математичною коректністю постановки та розв'язання задач, результатами математичного моделювання й експериментальних досліджень, узгодженістю отриманих результатів у граничних випадках із результатами інших авторів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

- Вперше створено модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка відрізняється від відомих застосуванням фрактальних, безперервних, ніде не диференційовних функцій та більш коректно описує особливості форми такого сигналу.
- Вперше розроблено метод аналізу сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, який ґрунтується на застосуванні фазових портретів та дозволяє визначати кількість і швидкість обертових роторів БПЛА.
- Удосконалено метод аналізу доплерівських сигналів, відбитих від мультироторного БПЛА, шляхом застосування засобів фрактального аналізу до їх фазових портретів.
- Запропоновано методику розпізнавання типу рухомого БПЛА, в якій використовуються принципово нові ознаки розпізнавання, а саме, форми фазового портрету та величини фрактальної розмірності, що дає змогу підвищити якість розпізнавання БПЛА мультироторного типу порівняно з іншими існуючими методиками.

Практична цінність результатів дисертації Д. О. Цюпака полягає у наступному.

- Експериментальні дослідження структури та форми доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, які проведено у рамках роботи, можна використовувати задля визначення характеру руху мультироторного БПЛА, спираючись на отримані особливості у структурі відбитих сигналів.
- Запропонована модель доплерівського сигналу, відбитого від обертових роторів БПЛА, яка створена з використанням фрактальних, безперервних, ніде не диференційовних функцій, може бути використана для пошуку додаткових нових ознак розпізнавання БПЛА мультироторного типу.
- Нові методи аналізу доплерівських сигналів, відбитих від обертових роторів БПЛА, а також запропонована методика розпізнавання типу рухомого БПЛА можуть бути використані для створення нових і вдосконалення існуючих систем розпізнавання радіолокаційних засобів спостереження.

Повнота висвітлення результатів в опублікованих працях. Всі результати дисертації Д. О. Цюпака опубліковано в провідних фахових національних і закордонних виданнях. Вони неодноразово доповідались на наукових конференціях високого рівня, де пройшли цілком достатню апробацію. Основні результати дисертації Д. О. Цюпака повною мірою викладено в *16 наукових публікаціях*: *3 наукових статтях* у виданнях, що належать до Переліку МОН України за спеціальністю 104 – фізика та астрономія («Радиофизика и электроника»), *1 науковій статті* у закордонному виданні, що індексується у наукометричній базі «Scopus» («Telecommunications and Radio Engineering»), *6 наукових статтях* в інших наукових виданнях України («Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України», «Системи озброєння і військова техніка», збірник наукових праць «Системи обробки інформації») та *6 тезах доповідей* конференцій різного рівня. На наукові праці Д. О. Цюпака є посилання у наукових роботах інших авторів, прізвище автора є відомим у наукометричних базах даних, зокрема, у «Scopus» (станом на початок жовтня 2021 р. – 1 цитування, 4 роботи автора).

Неправомірних запозичень та ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

Можливі шляхи використання результатів досліджень. Отримані в дисертаційній роботі Д. О. Цюпака наукові результати можуть бути використані в установах та організаціях, які займаються як безпосередньо питаннями розробки засобів контролю за БПЛА, а так і дослідженнями у галузі нелінійної динаміки та фрактального аналізу, зокрема, в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ, а також у вищих навчальних закладах, зокрема, ХНУ імені В. Н. Каразіна, ХНУРЕ, НТУ «ХПІ», НАКУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», ХНУПС імені Івана Кожедуба, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського », КНУ імені Тараса Шевченка, ДНУ імені Олеся Гончара і т. ін.

Оформлення дисертаційної роботи. Дисертаційну роботу написано загальнозрозумілою науковою мовою, оформлено відповідно до існуючих вимог Міністерства освіти і науки України, зміст і стиль викладання матеріалу свідчить про високий рівень наукової кваліфікації автора.

Зауваження та помічені недоліки

1. Оформлення роботи.
   - Інколи в тексті дисертації зустрічаються окремі технічні помилки (наприклад, стор. 36, абз. 2: «*Що* однією інформативною ознакою» замість «*Ще* однією інформативною ознакою»). Подекуди через це деякі речення не можливо прочитати (наприклад, «Scientific and practical results of *robots victorian* at the O. Ya. Usikov Institute…», стор. 6, абз. 6).
2. Мова та стиль викладання матеріалу.
   - Інколи зустрічаються тавтологія (наприклад, «…*складаються* з двох *складових*…», стор. 72, абз. 1, «…використано емпіричне *моделювання*, що

забезпечує *моделювання...*», стор. 179, абз. 2), а також окремі синтаксичні та пунктуаційні помилки.

- Подекуди автор вживає некоректні з точки зору української мови словосполучення та терміни: наприклад, «*щільність* потоку енергії» замість «*густина* потоку енергії» (стор. 31, абз. 3), «*недиференційованих* функцій» замість «*недиференційовних* функцій» (стор. 3, абз. 3), «*у останні десятиліття*» замість «*останніми десятиліттями*» (стор. 13, абз. 1, стор. 22, абз. 1), «*розповсюдження* акустичних хвиль» замість «*поширення* акустичних хвиль» (стор. 29, абз. 2), «*вирішуються* різноманітні *завдання*» замість «*розв'язуються* різноманітні *задачі*» (стор. 13, абз. 1), «методи *чисельного* моделювання» замість «методи *числового* моделювання» (стор. 15, абз. 2), «з *високим просторовим розрізненням*» замість «з *високою просторовою роздільною здатністю*» (стор. 24, абз. 3), «*кругових* поляризаціях» замість «*колових* поляризаціях» (стор. 36, абз. 1), «*ємкісна* розмірність» замість «*ємнісна* розмірність» (стор. 52, абз. 4) і т. і.
- Інколи зустрічаються порушення правил застосування сполучників «і», «та», «й» (наприклад, стор. 2, абз. 11, стор. 3, абз. 3) і прийменників «в», «у» (наприклад, стор. 3, абз. 2, 7).
- Фраза «персональна електронно-обчислювальна машина (ПЕОМ) типу «Notebook»» (стор. 62, абз. 4) у 2021 р. виглядає архаїзмом.

3. Використання в Анотації скорочень «БПЛА» та «ДС» виглядає дещо некоректним, оскільки пересічний читач, для якого її написано, зазвичай із ними просто не знайомий (особливо з другим скороченням).
4. На стор. 21 автор зазначає, що робота містить 146 сторінок основного тексту. У той самий час оглядовий розділ (Розділ 1) налічує 30 сторінок основного тексту. Це складає приблизно 20,5 %, тобто Розділ 1 виявляється дещо перевантаженим.
5. На стор. 98 автор справедливо зауважує, що «Особливості форми відбитих сигналів, які неможливо або важко досліджувати аналітично, піддаються наочному уявленню і якісному дослідженню за допомогою перетворення вихідного сигналу в іншу площину аналізу [57]». Але посилання *виключно* на власну роботу виглядає дещо дивним. Хіба всі методи частотного, часо-частотного, фрактального та мультифрактального аналізів не реалізують ту саму ідею?
6. Автор досить багато часу приділяє аналізові форм фазових портретів. Він добре розуміє, що коли є задача «навчити» автоматизовану систему самостійно приймати те чи інше рішення, аналіз виключно на якісному рівні є недостатнім, оскільки передбачає потребу постійного втручання людини. Тому як кількісний критерій автор слушно пропонує використовувати фрактальну розмірність. Це, насправді, дуже добре, але слід зауважити, що фрактальна розмірність описує лише ступінь щільності

заповнення фрактальним об'єктом простору, в який його занурено. Із рівності значень фрактальної розмірності для двох об'єктів не можна зробити жодних висновків щодо подібності їх внутрішніх структур. Наприклад, фрактальна розмірність Всесвіту Фурн'є дорівнює одиниці, але це зовсім не означає, що він є частиною кривої лінії. На мою думку, для кількісного описання фазових портретів можна було б також додати їх апроксимацію спеціально створеним набором нефрактальних елементарних структур. З огляду на велику кількість прикладів фазових портретів, наведених у дисертації, до такого набору можна було б включити, наприклад, коло, кільце, еліпс і т. і. Числові характеристики таких об'єктів (положення центру симетрії, параметри, які відповідають за форму), отримані, наприклад, методом найменших квадратів, дадуть змогу порівнювати ці фазові портрети між собою вже на кількісному рівні, а не лише на рівні суб'єктивних вражень дослідника. Наприклад, два «клубки ниток», про які так полюбляє згадувати автор, маючи однакову фрактальну розмірність, при апроксимації їх колом будуть відрізнятися положенням центрів кіл, а також їх радіусами.

7. Деяким результатам автора подекуди не вистачає узагальнення. Так, під час обчислення ємнісної фрактальної розмірності, отримавши на подвійному логарифмічному графіку добре відомий «ефект виснаження», автор пропонує використовувати для оцінки фрактальної розмірності лише ліву частину графіку. Більш того, на якісному рівні дається рекомендація щодо того, яку саме частину слід використовувати. Але отриманий результат є справедливим тільки для дискретного вектора даних фіксованої довжини, яка використовується саме в даних дослідженнях. Між тим, відомо, що величина лінійної ділянки графіка істотно залежить як від кількості точок досліджуваного сигналу, так і від типу обчислюваної фрактальної розмірності. На мою думку, було б корисно створити критерій і відповідний алгоритм визначення згаданої лінійної ділянки, оскільки це дасть змогу автоматизувати процес оцінки фрактальної розмірності.
8. Отримуючи фрактальні розмірності сигналів і фазових портретів, автор використовує лише їх точкові оцінки. Але зі статистичної точки зору такий підхід є неефективним. В алгоритмі методу найменших квадратів, який використовується для оцінки фрактальної розмірності, є можливість також оцінити її похибку. Джерелом такої похибки є те, що експериментальні точки на подвійному логарифмічному графіку для будь-якого *фізичного фрактала* ніколи не розташовуються точно на одній прямій. Останнє виглядає дуже важливим, оскільки врахування похибки оцінювання фрактальної розмірності може призвести до погіршення ефективності розроблених автором нових методів.

Але наведені вище недоліки суттєво не впливають на *загальне позитивне враження* від цікавої, змістовної та корисної дисертаційної роботи Д. О. Цюпака.

Загальний висновок

Дисертація відповідає спеціальності 104 – фізика та астрономія.

Дисертація є одноосібним завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язано актуальну *науково-практичну задачу* сучасної фізики, що полягає у розробці методів аналізу взаємодії електромагнітних хвиль з обертовими роторами БПЛА та визначення взаємозв'язків між параметрами ДС і кінематичними параметрами БПЛА.

Дисертаційна робота в цілому за отриманими результатами, змістом та оформленням *задовольняє вимогам* пункту 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. № 167, з урахуванням постанови Кабінету Міністрів України № 979 від 21.10.2020 року "Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 27 липня 2016 р. № 567 і від 6 березня 2019 р. № 167", а її автор **Цюпак Дмитро Олегович** *заслуговує на присудження* йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 – фізика та астрономія.

Офіційний опонент,
завідуючий кафедрою загальної фізики
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна,
доктор фізико-математичних наук, доцент Лазоренко О. В.

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ
Начальник відділу
кадрів

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА * КОД 02071205