

Вченому секретареві
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03
проф. Безруку Валерію Михайловичу

Харківський національний університет
радіоелектроніки
пр. Науки, 14, м. Харків, 61166

ВІДГУК

офіційного опонента професора кафедри електроніки, робототехніки і технологій
моніторингу та Інтернету речей Національного авіаційного університету
доктора технічних наук, професора **Яновського Фелікса Йосиповича**
на дисертаційну роботу **Рачкова Дмитра Сергійовича**
**«Уніфіковані системи міжперіодної обробки та оцінювання параметрів сигналів
доплерівських метеорадіолокаторів із довільними законами зондування»**,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Актуальність теми дисертаційних досліджень

Небезпечні явища погоди можуть становити значну загрозу для життя і здоров'я людей, об'єктів інфраструктури, безпеки польотів цивільної авіації, сільського господарства, наземного та водного транспорту, якщо завчасно не отримати інформацію про їх наближення та не вжити превентивних заходів для запобігання втрат.

Метеорологічні радіолокатори (МРЛ) – як наземного базування, так і бортові у складі повітряних суден – є важливою ланкою систем збору поточної метеоінформації. Важливий для потреб практики різновид МРЛ – доплерівські МРЛ (ДМРЛ), які здатні вимірювати як енергетичні (потужність), так і доплерівські (радіальна швидкість руху і ширину спектру швидкостей) параметри метеорологічних утворень (МУ).

Розробка нових метеорадарів чи модернізація існуючих пов'язані з комплексом наукових, технічних та інженерних завдань. Наприклад, підвищення точності чи/та однозначності оцінок метеопараметрів, які обчислюються ДМРЛ, вимагає синтезу нових методів обробки сигналів. При цьому, однак, недоцільно фокусуватися виключно на синтезі теоретично оптимальних за обраними критеріями методів, а необхідно також брати до уваги принципову можливість і складність їх практичної реалізації на обчислювальній елементній базі, на якій у ДМРЛ операції обробки сигналів виконуються у режимі реального часу.

Дисертаційні дослідження здобувача Д. С. Рачкова виконано саме на таку тему, яка є актуальною. Так, у роботі поставлено задачу підвищення точності та однозначності оцінювання трьох первинних параметрів МУ порівняно з відомими оцінками, що ґрунтуються на методі парних імпульсів. Цю задачу вирішено шляхом синтезу для ДМРЛ С-діапазону хвиль із довільними законами зондування нових алгоритмів оцінювання параметрів МУ як на фоні власного шуму каналів приймання, так і завадних відбиттів різного фізичного походження. Важливою особливістю досліджень є при цьому їх практична спрямованість: для запропонованих алгоритмів обґрунтовано рекомендації з їх практичної реалізації на єдиній основі адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ) із рекурентним настроюванням параметрів, які роблять можливою роботу

цих алгоритмів на сучасних цифрових сигнальних процесорах у режимі реального часу у ДМРЛ із різними вимогами до темпу оновлення оцінок метеопараметрів. Крім того, використання здобувачем АРФ у якості єдиної обчислювальної бази для реалізації запропонованих методів первинної міжперіодної обробки (МПО) сигналів ДМРЛ також дозволило у повній мірі використати факт наявності спільніх і навіть повторюваних операцій у різних завданнях обробки і синтезувати у результаті уніфіковану структуру системи МПО, де такі повторювані операції виконуються тільки один раз, а всі завдання обробки розв'язуються на основі решітчастих фільтрів.

Актуальність теми досліджень також підтверджується її зв'язком із Державною цільовою науково-технічною програмою створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження), затвердженою постановою № 834 Кабінету Міністрів України від 17.09.2008 р., і планами чотирнадцяти науково-дослідних, дослідно-конструкторських і науково-технічних робіт, які виконано у Харківському національному університеті радіоелектроніки і в яких здобувач був співвиконавцем.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертаційній роботі здобувачем отримано такі нові наукові результати.

1. Отримано закони (густини та функції) розподілу помилок оцінювання параметрів МУ у ДМРЛ із постійними і вобульованими інтервалами зондування. На основі цих законів розподілу, а не лише їх моментів, порівняно ряд оцінок параметрів МУ і за результатами запропоновано нові оцінки, що мають вищу точність, ніж відомі.

2. Розвинуто адаптивні методи оцінювання базових параметрів МУ у ДМРЛ С-діапазону хвиль: синтезовано дві модифікації методу парних імпульсів для ДМРЛ із поімпульсною та попачковою вобуляцією інтервалів зондування, перша з яких забезпечує практично необхідний діапазон однозначного вимірювання радіальних швидкостей МУ (± 50 м/с), а друга знижує помилки оцінювання ширини доплерівського спектру швидкостей (ДСШ) МУ у середньому вдвічі порівняно з відомими методами.

3. Розвинуто відомі та синтезовано нові методи точного оцінювання параметрів МУ на фоні завадних відбиттів різної фізичної природи:

– запропоновано методи заглушення завадних відбиттів від нерухомих предметів місцевості і рухомих точкових за дальностю повітряних об'єктів (ПО) за допомогою відповідно режекторних фільтрів із регульованими ширинами і глибиною зони режекції та виключення векторів, де виявлено сигнали повітряних об'єктів, зі складу вибірки відбиттів від МУ;

– запропоновано процедуру стрічково-діагональної регуляризації оцінок максимальної правдоподібності кореляційних матриць завадних відбиттів, яка підвищує енергетичну швидкодію (за критерієм втрат відношення сигнал/(завада+шум) на виході лінійного фільтру адаптивної обробки) синтезованих квазіоптимальних систем МПО сигналів точкових ПО на фоні МУ в умовах вибірок даних малого об'єму;

– кількісно проаналізовано вплив завадних відбиттів на точність оцінювання параметрів МУ на їх фоні та ефективність запропонованих методів їх заглушення.

4. Уперше для ДМРЛ С-діапазону хвиль із довільними інтервалами зондування синтезовано уніфіковану систему первинної МПО сигналів, яка, на відміну від відомих, будується на єдиній структурно-алгоритмічній основі АРФ, що настроюються за рекурентними алгоритмами R-рангової модифікації параметрів, і в якій спільні операції МПО виконуються лише один раз, що дозволило спростити систему МПО, забезпечити високу точність оцінювання параметрів МУ і знизити обчислювальні затрати.

Практичне значення отриманих результатів досліджень

У роботі отримано низку нових результатів, які є важливими для практики:

1) рекомендації з вибору принципу та кратності вобуляції інтервалів зондування ДМРЛ, об'єму вибірки відбиттів, методів оцінювання коефіцієнту міжперіодної кореляції відбиттів від МУ, а також енергетичних і доплерівських параметрів МУ на його основі, які у сукупності забезпечують оцінювання цих параметрів із точністю $\pm 1 \text{ дБ}$ і $\pm 1 \text{ м/с}$ відповідно;

2) метод синтезу фільтру із регульованими шириною та глибиною зони режекції, який забезпечує ефективне заглушення завадних відбиттів від місцевих предметів і простоту практичної реалізації;

3) рекомендації з вибору параметрів стрічково-діагональної регуляризації оцінок максимальної правдоподібності кореляційних матриць завад на основі принципу «очікуваної правдоподібності», які навіть при вибірках даних малого об'єму забезпечують високу швидкодію систем МПО гаусових сигналів на фоні гаусових завад;

4) алгоритм і математична програма квазіоптимальної МПО когерентних пачкових сигналів на фоні гаусових завад на основі АРФ, що настроюється за рекурентним алгоритмом R -рангової модифікації, які дозволяють реалізувати обробку у режимі реального часу на сучасному багатоядерному цифровому сигнальному процесорі;

5) рекурентні методи і схеми оцінювання параметрів МУ, які забезпечують низку обчислювальну складність практичної реалізації системи МПО сигналів ДМРЛ;

6) рекомендації з побудови систем первинної МПО сигналів ДМРЛ на уніфікованій основі АРФ, які спрощують обробку, виконуючи спільні її операції один раз.

Ряд отриманих у дисертації результатів із побудови систем первинної МПО на уніфікованій основі АРФ і методів обробки сигналів у них впроваджено у Казенному підприємстві «Науково-виробничий комплекс «Іскра» (м. Запоріжжя) і Державному підприємстві Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем «Квант-Радіолокація» (м. Київ), що засвідчено трьома актами про впровадження.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

За результатами аналізу рукопису дисертації, тексту автореферату і наукових публікацій здобувача, де висвітлено результати дисертаційних досліджень, встановлено, що наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у роботі, є добре обґрунтованими. Це досягається та підтверджується коректним застосуванням апробованих методів наукового дослідження для розв'язання сформульованих науково-технічних задач роботи, правильною фізичною інтерпретацією отриманих результатів статистичного математичного моделювання, узгодженістю низки отриманих у дисертації результатів статистичного моделювання з відомими результатами, узгодженістю результатів напівнатурних експериментів за записами сигналів діючої РЛС із результатами аналітичних розрахунків і статистичного математичного моделювання.

У Додатах А–К до дисертації наведено математичні викладки, доведення і допоміжні результати математичного моделювання, на яких ґрунтуються та якими пояснюється низка результатів, представлених в основному тексті дисертації.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій досягається коректною постановкою мети та науково-технічних задач дисертаційного дослідження, правильним застосуванням відомих моделей вхідних сигналів систем МПО ДМРЛ і

методів їх адаптивної міжперіодної обробки, правильністю виконуваних математичних перетворень, виврінням методики математичного моделювання за результатами аналітичних розрахунків, усередненням результатів статистичного математичного моделювання за великою кількістю незалежних випробувань, перевіркою та підтвердженням результатів математичного моделювання результатами напівнатурних експериментів з обробкою записів сигналів діючої РЛС.

Основні положення та результати роботи викладено і обговорено на 18 наукових і науково-технічних конференціях з індексацією 19 із 25 представлених доповідей у наукометричній базі Scopus. Низку отриманих практичних результатів із побудови систем МПО на уніфікованій основі АРФ впроваджено у провідних підприємствах України, що розробляють радіолокаційну техніку. Це додатково засвідчує достовірність сформульованих наукових положень, висновків і практичних рекомендацій.

Повнота викладу результатів дисертаційних досліджень в опублікованих працях

Результати дисертаційних досліджень у повній мірі опубліковано у 16 статтях (з них 7 індексовано наукометричною базою Scopus) у науково-технічних журналах, включених до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Міністерством освіти і науки України, 25 доповідях (з них 19 індексовано наукометричною базою Scopus) у збірниках праць міжнародних наукових конференцій, форумів і симпозіумів, а також включено до звітів про 10 науково-дослідних, 2 науково-технічні і 2 дослідно-конструкторські роботи. Отримано 1 патент України на корисну модель.

Таким чином, це задовільняє вимогам Наказу № 1220 від 23.09.2019 р. Міністерства освіти і науки України до кількості публікацій, де висвітлено основні результати дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата наук.

На усі публікації здобувача, де представлено результати досліджень, є посилання у тексті дисертації.

Оцінка змісту дисертації

Дисертація включає перелік умовних позначень, символів, скорочень, вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел із 260 найменувань і 13 додатків. Загальний обсяг дисертації – 289 сторінок друкованого тексту, з яких обсяг основного тексту – 159 сторінок. Роботу проілюстровано 120 рисунками і 17 таблицями.

Основні структурні елементи дисертації, а також її оформлення відповідають вимогам Наказу № 40 від 12.01.2017 р. Міністерства освіти і науки України «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

У вступі обґрунтовується актуальність теми дослідження, формулюються його об'єкт, предмет, мета і задачі, описуються методи дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих у роботі результатів, даються відомості про апробацію матеріалів дисертації, публікації за її темою та особистий внесок здобувача у них.

У розділах дисертації здобувачем ґрунтовно, доказово та повно викладаються зміст і результати виконаних досліджень, які пояснюють і підтверджують сформульовані у роботі наукові положення та практичні рекомендації.

Організація матеріалу дисертації за розділами є логічною. Так, Розділ 1 присвячено оцінюванню параметрів відбиттів від МУ на фоні власного шуму каналів приймання ДМРЛ, а Розділ 2 – оцінювання параметрів МУ на фоні адитивної суміші шуму каналів приймання ДМРЛ і завадних відбиттів від предметів місцевості та повітряних об'єктів. У Розділі 3 обґрунтуються обчислювально економні та стійкі спо-

соби практичної реалізації методів оброхи сигналів, запропонованих у Розділах 1–2, на уніфікованій структурно-алгоритмічній основі АРФ.

Висновки до роботи у повній мірі описують отримані у ній наукові результати і сформульовані на їх основі практичні рекомендації. Тут також наводяться перспективні напрямки подальших досліджень у предметній області дисертації.

Список використаних джерел включає 260 найменувань вітчизняних і зарубіжних робіт, які досить повно відображають сучасний стан науки та техніки за темою та напрямками дисертаційних досліджень.

У додатках наводяться відомості, необхідні для цілісного сприйняття роботи.

Дисертаційна робота Д. С. Рачкова за своїм змістом і результатами відповідає паспорту спеціальності 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Зміст автореферату дисертації Рачкова Д. С. повністю відповідає основним положенням, викладеним у тексті дисертації. Автореферат написано ясно, лаконічно та згідно з чинними вимогами до його оформлення; його зміст добре структуровано.

Зауваження щодо змісту дисертації

1. У дисертаційній роботі істотну увагу приділено синтезу та аналізу методів оцінювання параметрів відбиттів від метеорологічних утворень на фоні власного шуму каналів приймання ДМРЛ (Розділ 1) та на фоні завадних відбиттів від предметів місцевості і повітряних об'єктів (Розділ 2). При цьому задача виявлення цих метеорологічних утворень у роботі не розглядається. З огляду на те, що просторове розташування і межі зон, де наявні МУ, на практиці є априорі невідомими, доцільно розглядати комбіновану задачу виявлення-вимірювання параметрів МУ.

2. Відповідно до обґрунтованої у п. 1.3.3 дисертації моделі вхідних сигналів системи МПО ДМРЛ вважається, що ці сигнали апроксимуються дискретними процесами авторегресії різного порядку з єдиним коренем характеристичного рівняння. Спектральні густини потужності (СГП) таких процесів мають одну моду, у той час як спектри реальних метеовідбиттів можуть бути і багатомодовими. Тому доцільно було б увести до розгляду і більш складну апроксимацію СГП відбиттів від МУ.

3. Параметрами МУ, що аналізуються у дисертації, є середня потужність відбиттів від МУ, середня радіальна швидкість їх руху та ширина спектру швидкостей. У якості першого параметру замість середньої потужності було б доречно застосовувати відбиваність МУ, яка пов'язана з їх потужністю відомим перетворенням. Це не змінює відповідних результатів, отриманих у роботі, проте може бути корисним для їх інтерпретації прикладними метеорологами і розробниками метеолокаційної техніки.

4. На рис. 3.28 і рис. 3.33 показано два способи, як можна організувати у ковзному за дальністю вікні рекурентне обчислення передпорової статистики (ППС), що використовується у задачі виявлення точкових повітряних об'єктів на фоні відбиттів від МУ. При цьому на рис. 3.28 на наявність сигналу точкової цілі перевіряється центральний елемент вікна, а на рис. 3.33 – крайній праворуч. У типових для практики умовах, коли вхідні сигнали системи МПО є нестационарними за дальністю, ці два варіанти організації обчислень будуть нерівнозначними. У зв'язку з цим для таких умов доцільно порівняти вплив цих варіантів на результати обчислення ППС.

Наведені зауваження доцільно врахувати в подальшій роботі автора, але вони не впливають на мою високу оцінку проведених досліджень і результатів дисертацій-

ної роботи, отриманих здобувачем при розв'язанні поставлених задач, які характеризуються цілком достатнім рівнем наукової новизни і практичної цінності.

Висновок

Дисертація Д. С. Рачкова є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, в якій розв'язано актуальні науково-технічні задачі синтезу на основі адаптивних решітчастих фільтрів та аналізу ефективності уніфікованих систем первинної міжперіодної обробки сигналів імпульсних ДМРЛ із довільними (постійними і вобульзованими) інтервалами зондування. У роботі отримано нові науково обґрунтовані та достовірні результати і практичні рекомендації у галузі обробки (зокрема, міжперіодної) сигналів ДМРЛ, які дозволяють підвищити точність оцінювання первинних параметрів метеорологічних утворень у різних сигнально-завадових умовах і зменшити обчислювальну складність практичної реалізації систем первинної міжперіодної обробки сигналів доплерівських метеорадарів.

Практичне значення низки отриманих у дисертації результатів підтверджується їх впровадженням у провідних підприємствах України, які розробляють радіолокаційну техніку, що засвідчено трьома актами про впровадження.

Вважаю, що дисертаційна робота Дмитра Сергійовича Рачкова «Уніфіковані системи міжперіодної обробки та оцінювання параметрів сигналів доплерівських метеорадіолокаторів із довільними законами зондування» повністю відповідає вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., а її автор Д. С. Рачков заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи.

Офіційний опонент

професор кафедри електроніки, робототехніки
і технологій моніторингу та інтернету речей
Національного авіаційного університету,
лауреат Державної премії України,
IEEE Life Fellow,
доктор технічних наук, професор

Ф. Й. Яновський

