

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІВАШКО ІННА МИКОЛАЇВНА



УДК 621.396.967.2:048.3 (043.3)

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ
БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.22.13 – Навігація та управління рухом

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електроніки Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки
Яновський Фелікс Йосипович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Баранов Георгій Леонідович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри інформаційних систем і
технологій

кандидат технічних наук,
Васильєв Денис Володимирович,
Навчально-сертифікаційний центр Державного
підприємства обслуговування повітряного руху
України, старший викладач відділу підготовки
персоналу із зв'язку, навігації та спостереження

Захист відбудеться «28» травня 2019 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058 Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058 Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий «___» квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03



Н. С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення вимог до параметрів функціонування радіолокаційних станцій (РЛС) стало пусковим механізмом для повторного відкриття багатопозиційних радіолокаційних систем (БПРЛС), що відбулося в 1970-х роках. Завдяки сумісній обробці вимірювань, отриманих з різних точок простору, досягаються основні переваги багатопозиційних радіолокаційних систем, основними з яких є: підвищення ймовірності виявлення цілей, в тому числі й цілей з низькими швидкостями, підвищення точності оцінки параметрів цілей та їх класифікації. Крім того, було експериментально показано, що БПРЛС дозволяє виявляти цілі в повітряному просторі низьких висот (безпілотні літальні апарати (БПЛА) та небезпечні погодні явища, що виникають на висотах до 3 км).

Точність визначення параметрів цілі та ймовірність її виявлення залежать від характеристик кожної з РЛС системи, їх кількості та топології. В той час як ефективність об'єднання інформації (що визначається кількістю однозначно проідентифікованих цілей) залежить від рівня об'єднання інформації та алгоритму її обробки. Тобто, вимоги до точності визначення параметрів цілей накладають певні обмеження на положення передавальних та приймальних позицій БПРЛС, їх кількості та характеристик. Таким чином, ефективність роботи БПРЛС визначається кількістю передавальних та приймальних РЛС, а також їх топологією. Це, у свою чергу, формулює актуальну науково-прикладну задачу, що полягає в оптимізації структури та параметрів системи БПРЛС з метою забезпечення необхідної точності визначення параметрів цілі при мінімальній вартості системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Кваліфікаційна робота виконана згідно з планом проекту RAEBELL (Нідерланди), метою якого був аналіз та проектування систем для спостереження в просторі низьких висот. Також дана робота виконана згідно з планом розвитку систем управління повітряним рухом в Україні, з планом впровадження програми Єдиного Європейського Неба (Single European Sky (SES)), і в рамках фундаментальної держбюджетної науково-дослідної роботи за темою «Георетичне і експериментальне обґрунтування застосування поляризаційних властивостей зондувальних і відбитих сигналів для розширення функціональних можливостей МРЛ і підвищення ефективності виявлення небезпечних метеорологічних явищ» (номер держреєстрації 0110U003509).

Мета і завдання дослідження. Метою даного дисертаційного дослідження є подальший розвиток методу оцінки потенційної точності вимірювання кінематичних параметрів цілі в багатопозиційних радіолокаційних системах та методу оптимізації структури (кількості та топології) багатопозиційних радіолокаційних систем з метою забезпечення вимог до точності оцінки кінематичних параметрів цілі.

Для досягнення мети роботи було поставлено та розв'язано такі завдання:

1. Дослідження та аналіз методів вимірювання кінематичних параметрів цілі та характеристик роботи в багатопозиційних радіолокаційних системах.

2. Розробка статистичної моделі оцінки точності вимірювання часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу з врахуванням діаграми направленості антени, параметрів зондувального сигналу, типу вимірювань та параметрів цілі.

3. Вдосконалення методу оцінки точності вимірювання координат та вектору швидкості цілі в БПРЛС, що базується на моделі оцінки точності часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу, з врахуванням архітектури окремих РЛС та режиму прийому сигналів.

4. Виконання порівняльного аналізу точності оцінки кінематичних параметрів цілі в системах БПРЛС різних типів, що відрізняються між собою архітектурою та режимом прийому сигналів.

5. Виконання порівняльного аналізу точності локалізації цілі при різних параметрах зондувального сигналу та параметрах оцінки сигналу в одній РЛС.

6. Вибір критерію оптимальності для характеристики точності оцінки параметрів цілі в БПРЛС при розв'язанні задачі знаходження оптимальної кількості та топології окремих РЛС системи БПРЛС.

7. Вдосконалення методу оптимізації кількості та топології БПРЛС з моностатичною та бістатичною архітектурою на базі алгоритмів конвексної та жадібної оптимізації.

8. Виконання порівняльного аналізу результатів алгоритмів оптимізації з використанням різних цільових функцій при розв'язку задачі знаходження оптимальної топології систем БПРЛС різних типів.

Об'єкт дослідження – процеси визначення параметрів цілі в багатопозиційних радіолокаційних системах.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оптимізації, що застосовуються для знаходження оптимальної топології багатопозиційних радіолокаційних систем, яка у свою чергу визначається максимальною точністю оцінки параметрів цілі.

Методи дослідження. У кваліфікаційній роботі виконано аналіз точності вимірювання параметрів цілі в мережі радіолокаторів за допомогою методів математичного аналізу, статистичної обробки сигналів (метод Крамера-Рао) та статистичних випробувань (метод Монте Карло). За допомогою такої оцінки, методів чисельного та комп'ютерного (імітаційного) моделювання проаналізовано залежність точності оцінки параметрів цілі від типу системи, автономності прийнятого сигналу, параметрів кожної окремої РЛС, кількості РЛС та параметрів цілі. Для роботи з нелінійними моделями вимірювання використовувались методи наближення функцій. Чисельні методи розв'язку екстремальних задач (методи нелінійного програмування, «compressive sensing» [метод відновлення розрідженої інформації]) застосовано в алгоритмах оптимізації топології БПРЛС.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу – покращення ефективності функціонування БПРЛС шляхом підвищення точності вимірювання кінематичних параметрів цілі з використанням вдосконаленого методу оцінки потенційної точності вимірювання параметрів цілі в БПРЛС, а також проектування систем БПРЛС шляхом використання вдосконаленого методу структурно-параметричної оптимізації окремих РЛС з метою забезпечення необхідної точності оцінки кінематичних параметрів цілі при мінімальній вартості системи. У результаті розв'язання цієї задачі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше шляхом аналізу та статистичного моделювання було показано яким чином параметри оцінки сигналу в одній РЛС впливають на точність локалізації цілі в мережі БПРЛС, залежно від кількості РЛС, параметрів зондувального сигналу та швидкості цілі. Це дозволяє ефективно використовувати ресурси системи БПРЛС в режимі онлайн, запобігаючи використанню надлишкових вимірювань, при змінних параметрах цілі та системи.

2. Отримав подальший розвиток статистичний метод оцінки потенційної точності вимірювання параметрів цілі в системах БПРЛС шляхом:

– розробки моделі оцінки потенційної точності вимірювання часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу. На відміну від існуючих моделей, розроблена модель дозволяє врахувати діаграму направленості антени кожної з діючих РЛС системи. Модель враховує параметри зондувального сигналу, енергетичні характеристики РЛС та параметри цілі; та використовується для подальшого розвитку методу оцінки потенційної точності вимірювання кінематичних параметрів цілі в системі БПРЛС. Це дозволяє зробити оцінку точності параметрів цілі не тільки залежно від відстані РЛС-ціль, а й залежно від положення цілі відносно зони дій антен усіх РЛС системи. Крім того врахування форми діаграми направленості антени кожної з РЛС може бути використано при аналізі роботи системи БПРЛС, в яких має місце ефект блокування сигналу;

– отримання математичних залежностей для розрахунку потенційної точності вимірювання кінематичних параметрів цілі в мережі БПРЛС, що складається з РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу. Дані вирази враховують параметри зондувального сигналу, енергетичні характеристики РЛС, параметри цілі та параметри БПРЛС. Таким чином, виведені аналітичні вирази можуть використовуватись для аналізу потенційної точності вимірювання кінематичних параметрів цілі в існуючих системах БПРЛС, а також з метою покращення характеристик точності існуючих систем, шляхом зміни їх параметрів функціонування.

3. Подальшого розвитку набув метод оптимізації кількості і топології РЛС в системах БПРЛС шляхом:

– виведення математичних залежностей для розрахунку цільових функцій потенціал фрейму та логарифм детермінанту для нелінійної моделі вимірювань, якою описуються вимірювання кінематичних параметрів цілі в

системі БПРЛС неперервної дії з частотною модуляцією. Математичні залежності для розрахунку цільових функцій виведено шляхом лінеаризації нелінійної функції, що описує сигнал лінійно-частотної модуляції, навколо значень часу затримки та доплерівської частоти сигналу; лінеаризації нелінійної функції, що описує залежність координат цілі від часу затримки та доплерівської частоти сигналу. Це дозволило отримати вирази для розрахунку точності оцінки часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС, які використовувалися для виведення математичних залежностей потенціал фрейму та логарифм детермінанту для характеристики точності оцінки параметрів цілі в системі БПРЛС. Врахування нелінійності моделі вимірювань дозволяє застосовувати вдосконалений метод оптимізації топології БПРЛС з різними наборами параметрів, що характеризують: розмір зони спостереження, тип вимірювань, тип зондувального сигналу та енергетичні характеристики окремих РЛС;

– вдосконалення моделі, якою описується матриця вимірювань кінематичних параметрів цілі в системі БПРЛС шляхом введення вагових коефіцієнтів на параметри різних модальностей вектору оцінки. Це дозволяє застосовувати методи оптимізації топології БПРЛС з метою максимізації точності оцінки вектору параметрів цілі різних модальностей;

– розробки моделі вимірювань, що описує вимірювання кінематичних параметрів цілі в системі БПРЛС, що складається з РЛС бістатичної архітектури, та дозволяє враховувати режим прийому сигналів (автономний чи кооперативний). Дана модель використовується для характеристики потенційної точності оцінки параметрів цілі в системі БПРЛС та для розрахунку цільових функцій в методах оптимізації за рахунок введення розрідженої матриці вибірки бістатичних пар передавач-приймач.

Практичне значення отриманих результатів

1. Вперше було досліджено вплив параметрів сигналу, архітектури РЛС та ступеню автономності прийому сигналів на точність локалізації цілі в мережі БПРЛС з різними наборами параметрів шляхом використання статистичних методів математичного моделювання. Це дозволило зробити практичні рекомендації відносно шляхів підвищення потенційної точності оцінки параметрів цілі оптимального використання ресурсів системи.

2. Досліджено вплив сумісного використання вимірювань РЛС різних типів (пасивних та активних) на точність локалізації цілі в системах БПРЛС шляхом використання статистичних методів математичного моделювання. Вперше запропоновано використання вимірювань сигналів пасивних РЛС короткого діапазону дії (сигнали WiFi передавачів) на ряду з дослідженням впливу використання сигналів пасивних РЛС середнього діапазону дії (сигнали WiMAX), що представлено в науковій літературі. Використання вимірювань сигналів пасивних РЛС дозволяє підвищити точність локалізації цілі в системах БПРЛС короткого діапазону дії.

3. Вдосконалено алгоритми конвексної оптимізації шляхом використання методу напіввизначеної релаксації для формулювання обмежень, що

характеризують вибір моностатичних та бістатичних пар передавач-приймач в системах БПРЛС. Дані алгоритми дозволяють вирішувати актуальну науково-практичну задачу знаходження оптимальної топології передавальних та приймальних антен системи БПРЛС з моностатичною та бістатичною архітектурою з врахуванням режиму прийому сигналів.

4. Розроблено алгоритм жадібної оптимізації для цільових функцій потенціал фрейму та логарифм детермінанту, що дозволяють знаходити оптимальну топологію систем БПРЛС, що складаються з моностатичних та бістатичних РЛС. Жадібний алгоритм для оптимізації положень бістатичних РЛС дозволяє вибір бістатичних пар передавач-приймач в моделях, де потенційні положення передавальних та приймальних антен задаються одним набором координат.

5. Досліджено вплив конвексного та жадібного алгоритмів на розв'язок задачі знаходження оптимальної топології моностатичних РЛС в системі БПРЛС методами оптимізації та математичного моделювання. Наведено практичні рекомендації щодо використання конвексного та жадібного оптимізаційних алгоритмів відповідно до типу БПРЛС та розміру оптимізаційної задачі, який визначається кількістю потенційних положень РЛС.

Основні результати становлять науково-методологічну основу для створення комплексного інструменту моделювання, який можна розширювати та удосконалювати з метою отримання інструменту планування та дизайну системи БПРЛС. Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі для аналізу та порівняння ефективності роботи різних типів багатопозиційних радіолокаційних систем, а також для подальших наукових досліджень.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові та практичні результати кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно. З наукових робіт, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: [1] – розроблено оптимізаційний алгоритм на базі жадібної оптимізації з використанням моделі, яка містить зважену інформацію, для розрахунку цільових функцій; [2] – розроблено оптимізаційний алгоритм на базі конвексної оптимізації для знаходження положень бістатичних приймальних та передавальних антен РЛС; [3], [6], [7], [17] – досліджено вплив просторового розміщення приймальних та передавальних антен системи БПРЛС на точність визначення параметрів цілі; [4], [8] – проаналізовано вплив типу БПРЛС на точність локалізації цілі; [5], [9], [18], [19] – розроблено алгоритм, на базі генетичної оптимізації, для знаходження оптимального положення компонентів мультилатераційної системи спостереження; [10] – досліджено доцільність використання сигналів від пасивних джерел випромінювання, як джерела додаткової інформації для підвищення точності локалізації цілі в БПРЛС активного типу та розробка алгоритму оптимізації топології приймальних антен пасивних РЛС; [11] – дослідження впливу ширини діаграми направленості антени на точність оцінки параметрів цілі в БПРЛС та запропоновано метод включення даного

параметру в алгоритм знаходження оптимальної топології БПРЛС; [12] – досліджено особливості реалізації алгоритмів оптимізації топології різних типів БПРЛС та запропоновано узагальнену модель побудови цільових функцій; [13], [14], [15], [20], [21], [22] – досліджено явище багатошляхового поширення радіохвиль на ефективність роботи мультilaterаційних систем спостереження; [16] – розроблено алгоритм оптимізації топології БПРЛС, що дозволяє вибір положень окремих РЛС поза вузлами сітки потенційних положень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи обговорювались на: Міжнародній науковій конференції студентів та молодих вчених «ABIA-2011» Київ, НАУ; Міжнародному симпозиумі «Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS)» 2008, 2011 (Київ, НАУ); Міжнародному симпозиумі з обробки сигналів «SPS-2009» (Яхранка, Польща), «SPW-2010» (Вільнюс, Литва) та «SPS-2011» (Яхранка, Польща); Міжнародному симпозиумі «Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications», ESAVS 2010 (Берлін, Німеччина); Міжнародному радіолокаційному симпозиумі «IRS-2016» (Краків, Польща); Європейській радіолокаційній конференції «EuRAD-2013» (Нюрнберг, Німеччина), «EuRAD-2014» (Рим, Італія) та «EuRAD-2015» (Париж, Франція); Міжнародній радіолокаційній конференції «RADAR-2016» (Гуангджоу, Китай).

Публікації. Основні положення роботи викладено в 22 наукових працях. З них: статті у наукових закордонних журналах – 2; статті у наукових фахових виданнях з переліку ВАК – 3; рецензовані статті у матеріалах міжнародних конференцій – 11; тез доповідей – 6. Кількість публікацій, що увійшли до міжнародної наукометричної бази Scopus – 12.

Структура та обсяг дисертації. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 184 сторінок (обсяг основного тексту 144 сторінок) друкованого тексту, включаючи 60 рисунків, 11 таблиць, 4 додатки, список використаних джерел з 108 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, виконано формулювання мети й завдань дисертаційної роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, методологічні основи досліджень, описані основні наукові результати, новизна та практична цінність отриманих результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами й темами, а також наведено відомості про публікації, апробацію та структуру роботи.

У **першому розділі** наведено класифікацію багатопозиційних радіолокаційних систем та визначено тип систем, що розглядаються в даній кваліфікаційній роботі. Проаналізовано основні переваги БПРЛС, в порівнянні з однією РЛС; та розглянуто технічні задачі, що виникають на етапі проектування та технічної експлуатації.

Проаналізовано основні методи оцінки параметрів цілі в БПРЛС та критерії оцінки, що можуть слугувати цільовими функціями при знаходженні оптимальної топології БПРЛС. Обґрунтовано вибір критеріїв, що використовуються в даній кваліфікаційній роботі для аналізу точності оцінки параметрів цілі в БПРЛС та в якості цільових функцій для знаходження оптимальної топології БПРЛС. Виконано аналіз рішень, що наводяться в науковій літературі для розв'язку даних задач; та наведено основні відмінності від завдань, поставлених в даному дисертаційному дослідженні.

У **другому розділі** було розроблено статистичну модель оцінки точності вимірювання часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу. На основі даної моделі отримано аналітичні вирази для розрахунку нижніх границь величин дисперсії оцінки даних параметрів. Крім того, вперше було враховано форму діаграми направленості антени у вирази для оцінки параметрів сигналу в одній РЛС. Це дозволяє побудувати більш точний розподіл похибок в БПРЛС, де кожна з позицій характеризується визначеною діаграмою направленості, залежно від положення цілі. Отримані теоретичні результати використовуються для розрахунку потенційної точності оцінки положення та вектору швидкості цілі в системі БПРЛС. З цією метою розглядаються сигнал лінійно-частотної модуляції. Продемонстровано використання даних теоретичних результатів для аналізу потенційної точності БПРЛС різних типів, що визначаються архітектурою РЛС, ступенем автономності прийому сигналів, параметрами зондувального сигналу та моделлю вимірювання. Проаналізовано також можливість підвищення точності існуючих систем БПРЛС шляхом використання сигналів некооперативних передавачів. Крім того, наводиться аналіз потенційної точності локалізації цілі в мультиталераційних системах спостереження.

Загальна нелінійна модель вимірювання в БПРЛС має вигляд:

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\alpha}) + \boldsymbol{\xi}, \quad (1)$$

де $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{Q(N_r, N_t)}$ – це вектор вимірювань, Q – це кількість семплів вимірюного сигналу за повний час інтегрування в одній РЛС, $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^K$ – це вектор параметрів оцінки, \mathbf{f} – це нелінійна векторна функція, $\boldsymbol{\xi}$ – це шум вимірювань; N – це кількість бістатичних пар передавач-приймач, що при кооперативному режимі прийому сигналу визначається як добуток кількості передавальних (N_t) та приймальних (N_r) позицій.

Сигнал, відбитий від рухомої цілі визначається

$$y^{(n)} = f^{(n)}(t; \boldsymbol{\alpha}) + \xi^{(n)}(t), \quad (2)$$

де $\boldsymbol{\alpha} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z]$ – це вектор параметрів оцінки; $\xi^{(n)}(t)$ – це незалежний гаусівський шум з нульовим середнім значенням та дисперсією σ^2 ; нелінійною функцією є сигнал, відбитий від цілі:

$$f^{(n)}(t; \mathbf{\alpha}) = A^{(n)} \exp(-j(t - \tau^{(n)})\omega_d^{(n)})x^{(n)}(t - \tau^{(n)}), \quad (3)$$

де $x^{(n)}(t - \tau^{(n)})$ – це сигнал, відбитий від цілі; $A^{(n)} = |A^{(n)}| \exp(j\phi^{(n)})$ – це амплітуда відбитого сигналу; $\tau^{(n)}$ – це час затримки сигналу, пропорційний відстані до цілі $R^{(n)}$

$$\tau^{(n)} = \frac{R^{(n)}}{c} = \frac{R_t^{(n_i)} + R_r^{(n_r)}}{c}, \quad (4)$$

де $R_t^{(n_i)}$ та $R_r^{(n_r)}$ це відстані від n_i -го передавача та n_r -го приймача до цілі; $n_i = 1, \dots, N_t$ та $n_r = 1, \dots, N_r$.

$$R_t^{(n_i)} = \sqrt{(x - x_t^{(n_i)})^2 + (y - y_t^{(n_i)})^2 + (z - z_t^{(n_i)})^2}, \quad (5)$$

$$R_r^{(n_r)} = \sqrt{(x - x_r^{(n_r)})^2 + (y - y_r^{(n_r)})^2 + (z - z_r^{(n_r)})^2}, \quad (6)$$

де c – швидкість світла; (x, y, z) , $(x_t^{(n_i)}, y_t^{(n_i)}, z_t^{(n_i)})$, $(x_r^{(n_r)}, y_r^{(n_r)}, z_r^{(n_r)})$ – це вектори координат цілі, n_i -го передавача та n_r -го приймача. Доплерівська частота виміряного сигналу $f_d^{(n)} = \omega_d^{(n)} / 2\pi$ в n -й парі передавач-приймач визначається радіальними компонентами швидкості цілі в напрямку до n_i -го передавача та n_r -го приймача:

$$f_d^{(n)} = \frac{f_c^{(n_i)}}{c} \left(\frac{\partial R_t^{(n_i)}}{\partial t} + \frac{\partial R_r^{(n_r)}}{\partial t} \right), \quad (7)$$

де

$$\frac{\partial R_t^{(n_i)}}{\partial t} = \frac{v_x(x - x_t^{(n_i)}) + v_y(y - y_t^{(n_i)}) + v_z(z - z_t^{(n_i)})}{R_t^{(n_i)}},$$

$$\frac{\partial R_r^{(n_r)}}{\partial t} = \frac{v_x(x - x_r^{(n_r)}) + v_y(y - y_r^{(n_r)}) + v_z(z - z_r^{(n_r)})}{R_r^{(n_r)}},$$

v_x, v_y, v_z – проєкції вектору швидкості \mathbf{v} цілі на координатні осі x , y , та z .

Для РЛС неперервної дії з ЛЧМ, функція невизначеності сигналу визначається наступним чином:

$$|\chi(\tau, \omega_d)| = \frac{\sin\left(\tau\Delta\omega - \frac{\omega_d T_s}{2}\right)}{\tau\Delta\omega - \frac{\omega_d T_s}{2}} \times \frac{\sin\left(\frac{M\omega_d T_s}{2}\right)}{\frac{\omega_d T_s}{2}} \times \frac{1}{M}. \quad (8)$$

Нижні границі на дисперсії похибок функції оцінки:

$$\text{var}(\tau) = \sigma_{\tau\tau}^2 = \frac{3}{2} \frac{1}{\Delta\omega^2 \text{SNR}}, \quad (9)$$

$$\text{var}(\omega_d) = \sigma_{\omega_d \omega_d}^2 = \frac{6}{T_s^2 M^2 \text{SNR}}, \quad (10)$$

де відношення сигнал-шум визначається як: $\text{SNR} = |A|^2 / N_0$.

Потенційна точність оцінки параметрів цілі як в моностатичних так і в бістатичних БПРЛС може бути підвищена шляхом використання кооперативного режиму прийому сигналів (рис.1). Кооперативний режим прийому сигналів дозволяє отримати більше вимірювань, забезпечуючи таким чином вище значення ВСШ та точність оцінки положення цілі, відповідно. Крім цього, в БПРЛС з автономним режимом прийому сигналів, просторове рознесення приймальної та передавальної антен не призводить до підвищення точності оцінки координат цілі. Це пояснюється тим, що занадто довга чи занадто коротка довжина бази, у порівнянні з відстанню до цілі, розриває контури сталих величин ВСШ або ж призводить до квазі-моностатичної архітектури РЛС. З рис. 2 видно, що еквівалентну точність мережі з десяти РЛС з шириною смуги пропускання 300 МГц можна отримати в мережі з п'яти РЛС з шириною смуги пропускання 500 МГц. Причиною є те, що у двох типах мереж, величини сумарної смуги пропускання мережі є майже однаковими та рівні 3 ГГц та 2,5 ГГц відповідно. Залежність похибки локалізації цілі від кількості пасивних РЛС (при наявності однієї передавальної та різній кількості приймальних антен) при різній кількості РЛС неперервної дії зображено на рис. 3. Вже при наявності трьох приймальних антен, що вимірюють Wi-Fi сигнал, похибка локалізації цілі суттєво зменшується. Проте, вже при додаванні дев'яти приймальних антен, похибка локалізації цілі залишається сталою навіть при подальшому збільшенні кількості пасивних РЛС.

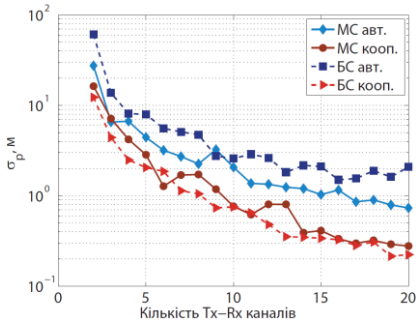


Рис. 1. Залежність похибки локалізації цілі від кількості каналів передавач-приймач. Без обмежень на довжину бази бістатичних РЛС

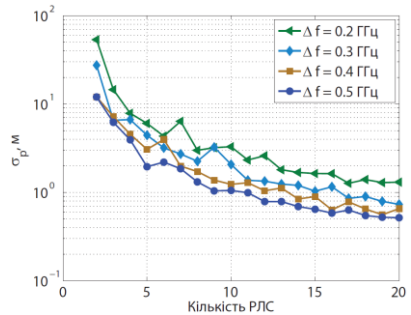


Рис. 2. Залежність похибки локалізації цілі від кількості моностатичних РЛС (з автономним режимом прийому сигналів) при різних величинах ширини смуги пропускання

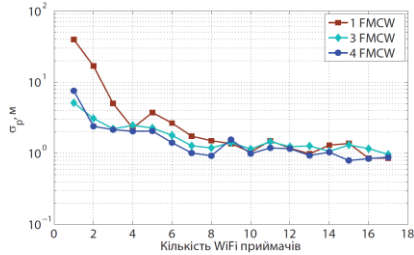


Рис. 3. Залежність похибки локалізації цілі від кількості пасивних РЛС при одночасному використанні вимірювань активних і пасивних РЛС (для різної кількості активних РЛС)

Розподіл похибки локалізації цілі в мультилатераційних системах спостереження, що складаються з чотирьох та десяти приймальних антен, зображено на рисунках 4а та 4б, відповідно. При цьому, топологія системи з десяти приймачів є свого роду розширенням системи з чотирьох приймачів. Як видно з даних рисунків, шість додаткових приймачів системи дозволяють підвищити точність локалізації цілі в центральній частині зони спостереження майже в три рази.

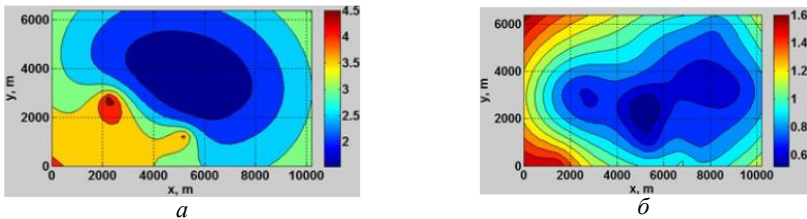


Рис. 4. Розподіл похибки локалізації цілі в мультилатераційній системі спостереження: *а* – чотири приймачі; *б* – десять приймачів

У **третьому розділі** адаптовано для моделі нелінійних вимірювань цільові функції та розроблено модель, яка містить зважену інформацію для розрахунку даних функцій. Виведено вирази, що характеризують потенційну точність оцінки часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією. Вдосконалено методи оптимізації кількості і топології РЛС системи БПРЛС.

Задачу оптимізації кількості РЛС та їх положення можна сформулювати двома шляхами:

$$\begin{aligned} & \min |I| \\ & \text{s.t. } f(I) \geq \lambda_g, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \min f(I) \\ & \text{s.t. } |I| = L, \end{aligned} \quad (12)$$

де N ($|N| = N$) – це набір потенційних положень та $\Lambda = \{i_1, \dots, i_L\}$;

($|\Lambda| = L$) – це набір найбільш оптимальних положень РЛС, таких, що $\Lambda \subseteq N$ і $L \leq N$, I – це набір вибраних положень РЛС та λ_g – це обмеження (поріг) на величину цільової функції.

Оскільки коваріаційна матриця похибок для нелінійної моделі вимірювань залежить від вектору параметрів оцінки \mathbf{a} , то відповідні цільові функції також залежатимуть від \mathbf{a} . Тому, в даному випадку простір вектору параметрів представляється у вигляді набору вузлових точок M з можливими значеннями вектору параметрів $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\}$. Крім того, нелінійна модель вимірювань лінеаризується навколо кожної з даних вузлових точок α_m , використовуючи розклад в ряд Тейлора:

$$\mathbf{y} \approx \mathbf{f}(\alpha_m) + \mathbf{G}_m^{(N)}(\mathbf{a} - \alpha_m) + \xi, \quad (13)$$

де компоненти матриці $\mathbf{G}_m^{(N)} \in \mathbb{R}^{N \times Q \times K}$ визначаються

$$\left[\mathbf{G}_m^{(N)} \right]_{(n-1)Q+k, k} = \left. \frac{\partial f_{(n-1)Q+k}(\mathbf{a})}{\partial \alpha_k} \right|_{\alpha = \alpha_m}; \quad q = 1, \dots, Q; \quad n = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K; \quad m = 1, \dots, M.$$

Алгоритм конвексної оптимізації БПРЛС з моностатичною архітектурою. Алгоритм конвексної оптимізації для знаходження оптимальної топології РЛС формулюється як вибір мінімального числа положень РЛС з N потенційних положень для задоволення визначених вимог до точності оцінки параметрів цілі α_m , в кожній з вузлових точок M . Оптимізаційна задача мінімізації кількості елементів множини вибраних позицій РЛС формулюється як мінімізація l_1 -норми вектору вагових коефіцієнтів $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^N$, що можуть приймати значення $0 \leq w^{(n)} \leq 1$. Таке обмеження на величини вагових коефіцієнтів є релаксацією булевого обмеження $\{0, 1\}$, що означає ігнорування або вибір відповідного n -го положення. Матриця Фішера в даному випадку має адитивний характер і визначається наступним чином:

$$\mathbf{I}(\alpha_m) = \sum_{n=1}^N w^{(n)} \mathbf{I}^{(n)}(\alpha_m), \quad (14)$$

де $\mathbf{I}^{(n)}(\alpha_m)$ – це матриця Фішера оцінки параметрів цілі в n -й РЛС. Таким чином, вклад кожної з РЛС в потенційну точність оцінки вектору параметрів цілей можна проінтерпретувати як використання вимірювань параметрів сигналу тієї чи іншої РЛС для оцінки вектору параметрів цілі. Кожен з параметрів вектору $w^{(n)}$ визначає вибір чи ігнорування n -ї (позиції) РЛС. Іншими словами: використання чи невикористання вимірювань відповідної РЛС. Крім того, для забезпечення розрідженого рішення, вводиться додатковий вектор $\mathbf{u} = [u^{(1)}, \dots, u^{(N)}]^T$ з метою використання алгоритму

ітеративного зваження l_1 -норми. Оптимізаційна задача має вигляд

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_k &= \arg \min(\mathbf{u}_k^T \mathbf{w}), \quad \mathbf{w} \in R^N; \\ \text{s.t. } \sum_{n=1}^N w^{(n)} \mathbf{I}^{(n)}(\boldsymbol{\alpha}_m) - \lambda_g \mathbf{1}_3 &\succeq 0, \quad m=1, \dots, M; \\ \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{w} \\ \mathbf{w}^T & 1 \end{bmatrix} &\succeq 0; \\ \text{diag}(\mathbf{W}) &= \mathbf{w}; \end{aligned} \tag{15}$$

де $\mathbf{W} = \mathbf{w}\mathbf{w}^T$; обмеження $\begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{w} \\ \mathbf{w}^T & 1 \end{bmatrix} \succeq 0$ є еквівалентом обмеження типу

$\mathbf{W} \succeq \mathbf{w}\mathbf{w}^T$ називається релаксацією оригінальної неконвексної задачі квадратичного програмування з квадратичними обмеженнями (non-convex quadratically constrained quadratic programs [QCQP]) шляхом використання напіввизначеного програмування (semidefinite programming [SDP]). Алгоритм 1 містить псевдокод конвексної оптимізації даної задачі.

Алгоритм 1:	Алгоритм конвексної оптимізації топології моностатичних РЛС в системі БПРЛС
Вхідні дані:	M матриць $\mathbf{G}_m^{(N)}$; множина потенційних положень РЛС N ; функція, що характеризує точність оцінки параметрів цілі в БПРЛС $\lambda_{\min}(\mathbf{I}(\boldsymbol{\alpha}_m))$; вимоги до точності оцінки у формі обмеження λ_g .
Вихідні дані:	Координати мінімальної кількості РЛС.
Ініціалізація:	Кількості ітерацій $k=0$ та вектору зважених коефіцієнтів $\mathbf{u} = \mathbf{1}_N$.
Повторення:	До досягнення максимальної кількості ітерацій $k = k_{\max}$.

Розв'язок задачі зваженої мінімізації l_1 -норми (15) для оптимальної матриці \mathbf{W} в k -й ітерації.

Оновити вектор вагових коефіцієнтів $u_k^{(n)} = 1 / [\varepsilon + w_k^{(n)}]$ для кожної $n = 1, \dots, N$ та номер ітерації $k = k + 1$.

Жадібний алгоритм оптимізації БПРЛС з моностатичною архітектурою. Максимізація функції потенціал фрейму відповідає видаленню (найменш інформативних) рядків з матриці $\mathbf{G}_m^{(N)}$, в той час як максимізація функції логарифм детермінанту відповідає вибору (найбільш інформативних) рядків для формулювання матриці $\mathbf{G}_m^{(\Lambda)}$. Псевдокод максимізації цих двох функцій наведено в алгоритмі 2.

Алгоритм 2:	Жадібний алгоритм оптимізації топології моностатичних РЛС в системі БПРЛС
Вхідні дані:	M матриць $\mathbf{G}_m^{(N)}$; множина потенційних положень РЛС N ; кількість положень, що необхідно вибрати L ; функція, що характеризує точність оцінки параметрів цілі в БПРЛС $F(\cdot)$ (потенціал фрейму або логарифм детермінанту).
Вихідні дані:	Координати L РЛС.
Ініціалізація:	Набору координат РЛС, I .
	1) Для функції зваженого потенціалу фрейму: $\mathbb{I} = \arg \min_{i, j \in N} \sum_{m=1}^M p_m \left \text{tr} \left\{ \mathbf{G}_m^{(i)} (\mathbf{G}_m^{(j)})^H \right\} \right ^2.$
	2) Для функції (зваженого) логарифму детермінанту: $\mathbb{I} = \arg \max_{i \in N} F(G_m^{(i)}).$
Повторення:	Поки не знайдено L позицій РЛС.
	1) Знайти координати однієї РЛС $i = \arg \max_{i \in I} F(I \cup i)$.
	2) Оновити $I : \mathbb{I} = I \cup i$.
	3) Для функції зваженого потенціалу фрейму: (а) Якщо $ \mathbb{I} = N - L$, зупинити. (б) Присвоїти множину вибраних положень РЛС $\Lambda = N \setminus I$.
	4) Для функції зваженого логарифму детермінанту: (а) Якщо $ I = L$, зупинити. (б) Присвоїти множину вибраних положень РЛС $\Lambda = I$.

Оптимізація топології системи БПРЛС з бістатичною архітектурою.

Матриця Фішера для такої системи задається виразом:

$$\mathbf{I}(\mathbf{w}_t, \mathbf{w}_r, \mathbf{a}_m) = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{s=1}^{N_r} w_t^{(n)} w_r^{(s)} \mathbf{I}(\mathbf{a}_m)^{(ns)}. \quad (16)$$

Для знаходження оптимальної топології бістатичних РЛС, положення передавальних N_t та приймальних N_r антен повинні вибиратися одночасно.

Для знаходження розв'язку задачі знаходження оптимальної топології бістатичних БПРЛС використовувався метод напіввизначеної релаксації. При застосуванні даного методу, вводиться нова векторна змінна

$\boldsymbol{\gamma} = [w_t^{(1)}, \dots, w_t^{(N_t)}, w_r^{(1)}, \dots, w_r^{(N_r)}]^T$ для позначення білінійних членів $w_t^{(n)}$, $w_r^{(s)}$ та відповідне обмеження на елементи даного вектору γ_j . Також вводиться

релаксація обмеження на елементи вектору $\mathbf{g} = (\mathbf{g}_t, \mathbf{g}_r)^T$:

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{w}_t \in R^{N_t}, \mathbf{w}_r \in R^{N_r}} (\mathbf{u}_t^T \mathbf{w}_t + \mathbf{u}_r^T \mathbf{w}_r); \\
& \text{s.t. } \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{s=1}^{N_r} \mathbf{g}^{(n,s)} \mathbf{I}(\boldsymbol{\alpha}_m)^{(n,s)} - \lambda_g \mathbf{1}_3 \succeq 0, \quad m = 1, \dots, M; \\
& \mathbf{g}^{(n,s)} = \mathbf{w}_t^{(n)} \mathbf{w}_r^{(s)}, \quad n = 1, \dots, N_t, \quad s = 1, \dots, N_r; \\
& \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \boldsymbol{\gamma} \\ \boldsymbol{\gamma}^T & 0 \end{bmatrix} \succeq 0;
\end{aligned} \tag{17}$$

де $\mathbf{Y} = \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\gamma}^T$. Оптимізаційна задача (17) є проблемою напіввизначеного програмування. Псевдокод конвексного алгоритму розв'язку оптимізаційної задачі (17) наведено в алгоритмі 3. Псевдокод алгоритму *жадібною оптимізації* для знаходження оптимальної топології бістатичних РЛС наведено в алгоритмі 4.

Алгоритм 3:	Алгоритм конвексної оптимізації топології бістатичних РЛС в системі БПРЛС
Вхідні дані:	M матриць $\mathbf{G}_m^{(N_t \times N_r)}$; множини потенційних положень передавальних РЛС N_t та приймальних РЛС N_r ; функція, що характеризує точність оцінки параметрів цілі в БПРЛС $\lambda_{\min}(\mathbf{I}(\boldsymbol{\alpha}_m))$; вимоги до точності оцінки у формі обмеження λ_g .
Вихідні дані:	Координати мінімальної кількості передавальних та приймальних позицій бістатичних РЛС.
Ініціалізація:	Кількості ітерацій $k = 0$ та векторів зважених коефіцієнтів $\mathbf{u}_t = \mathbf{1}_{N_t}$, $\mathbf{u}_r = \mathbf{1}_{N_r}$.
Повторення:	До досягнення максимальної кількості ітерацій $k = k_{\max}$.

Розв'язок задачі зваженої мінімізації l_1 -норми (17) для оптимального вектору $\boldsymbol{\gamma}_k$ в k -й ітерації.

Оновити вектори вагових коефіцієнтів $[u_t^{(n)}]_k = \frac{1}{\varepsilon + [w_t^{(n)}]_k}$ та $[u_r^{(s)}]_k = \frac{1}{\varepsilon + [w_r^{(s)}]_k}$ для кожного $n = 1, \dots, N_t$ та $s = 1, \dots, N_r$ номер ітерації $k = k + 1$.

Алгоритм 4: Жадібний алгоритм оптимізації топології бістатичних РЛС в системі БПРЛС для функції потенціал фрейму

Вхідні дані: M матриць $\mathbf{G}_m^{(N_t \times N_r)}$; дві множини потенційних положень передавальних N_t та приймальних N_r РЛС; кількість положень передавальних L та приймальних антен, що необхідно вибрати.

Вихідні дані: Координати передавальних L_t та приймальних L_r антен.

Ініціалізація: Наборів координат передавальних Σ та приймальних \mathcal{G} антен:

$$\Sigma \cup \mathcal{G} = \arg \max_{s \in \Sigma, j \in \mathcal{G}} F(\mathbf{g}^{(s,j)}).$$

Продовж. алгор. 4:

Наборів координат передавальних та приймальних антен, що формують кооперативні пари з вибраними РЛС:

$$A_t = \{ \} (|A_t| = 0) \text{ та } A_r = \{ \} (|A_r| = 0).$$

Цикл For: $t = 1$ to L_t

Цикл For: $r = 1$ to L_r

1) Знайти оптимальне вимірювання бістатичної пари передавач-приймач

(а) для *кооперативного* режиму прийому сигналів:

$$\{s, j\} = \arg \max_{s \in \Sigma, j \in \mathcal{G}} F(\Sigma \cup s, \mathcal{G} \cup j, A_t \cup j, A_r \cup s);$$

(б) для *автономного* режиму прийому сигналів:

$$\{s, j\} = \arg \max_{s \in \Sigma, j \in \mathcal{G}} F(\Sigma \cup s, \mathcal{G} \cup j).$$

2) Оновити

$$\Sigma : \Sigma = \Sigma \cup s;$$

$$\mathcal{G} : \mathcal{G} = \mathcal{G} \cup j;$$

$$A_t : A_t = A_t \cup j;$$

$$A_r : A_r = A_r \cup s;$$

(а) набори приймальних і передавальних антен співпадають,

$$N_t = N_r = N;$$

$$N_t : N_t = N_t \setminus \{s \cup j\};$$

$$N_r : N_r = N_r \setminus \{s \cup j\}.$$

(б) набори приймальних і передавальних антен не співпадають,

$$N_t \neq N_r;$$

$$N_t : N_t = N_t \setminus s;$$

$$N_r : N_r = N_r \setminus j.$$

У **четвертому розділі** застосовано метод знаходження оптимальної топології мережі РЛС для різних типів систем БПРЛС. Метою даного розділу є демонстрація універсальності розроблених методів, порівняння алгоритмів

оптимізації та цільових функцій. Зокрема, розглянуто мережі як моностатичних так і бістатичних РЛС короткої та середньої дальності дії з кооперативним або ж автономним режимом прийому сигналів.

На рис. 5 зображено розподіл похибки локалізації цілі для оптимальних топологій БПРЛС автономного та кооперативного режимів прийому сигналів. Як видно з результатів, мінімальна кількість РЛС в мережі з кооперативним режимом прийому сигналів є в три рази меншою ($L = 5$), ніж в мережі з автономним режимом прийому сигналів ($L = 15$). Але при цьому, слід зазначити, що кількість каналів прийому-передачі в мережі з кооперативним режимом прийому сигналів майже в два рази більше (є рівною 25), ніж в мережі з автономним режимом прийому сигналів і при цьому величина похибки локалізації цілі є вищою для мережі з кооперативним режимом прийому сигналів. Причиною є низький коефіцієнт просторового підсилення для п'яти положень РЛС, у порівнянні з п'ятнадцятьма рознесеними РЛС.

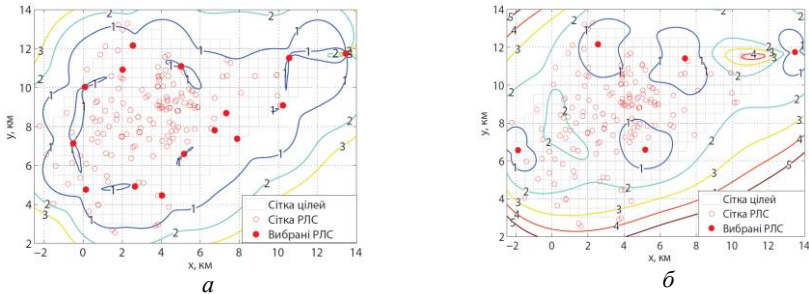


Рис. 5. Розподіл похибки локалізації цілі в БПРЛС з L моностатичних РЛС, вибраних з $N=161$ потенційних положень з використанням алгоритму конвексної оптимізації: $a - L = 15$, автономний режим; $b - L = 5$, кооперативний режим

В моделях, де потенційні положення передавальних та приймальних антен задаються одним набором, при виборі топології системи повинно включатись так зване ітеративне обмеження, що запобігає вибору моностатичних пар передавач-приймач. Таке обмеження не задовольняє умову випуклості і тому не може бути включено в алгоритм конвексної оптимізації. Результатом є те, що вибирається моностатична топологія РЛС, як видно з рис. 6а, де 15 вибраних пар передавач-приймач є моностатичними. На відміну від алгоритму конвексної оптимізації, обмеження, що запобігає вибору моностатичних пар передавач-приймач може бути включено в жадібний алгоритм, що дозволяє вибір бістатичної топології РЛС (рис. 6б).

Розподіл похибки локалізації цілі для топологій РЛС, вибраних без врахування і з врахуванням ефекту блокування сигналу зображено на рис. 7. Припускається, що діаграми направленості РЛС є всенаправленими в горизонтальній площині. Аналогічно до попередніх результатів, використовується алгоритм конвексної оптимізації з обмеженням на величину

максимальної похибки локалізації цілі. Якщо ефект блокування сигналу не береться до уваги при знаходженні оптимальної топології РЛС, така система в реальних умовах не забезпечуватиме необхідної точності локалізації цілі (рис. 7а). На відміну від цього, топологія РЛС, вибрана з врахуванням ефекту блокування сигналу забезпечує необхідну точність локалізації цілі в усій зоні спостереження (рис. 7б).

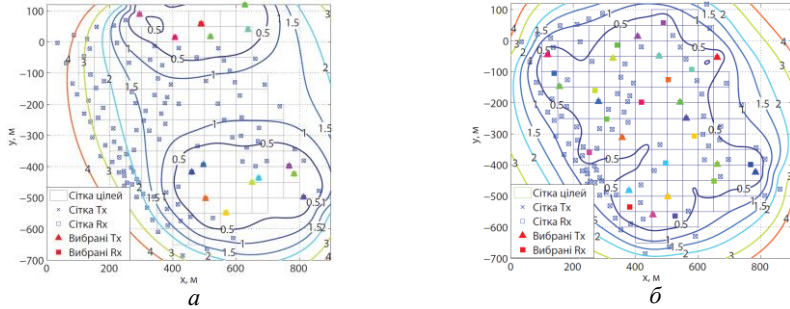


Рис. 6. Розподіл похибки локалізації цілі в мережі бістатичних РЛС з кооперативним режимом прийому; топологію приймальних та передавальних антен вибрано з одного набору потенційних положень ($L_t = L_r = 15$): а – алгоритм конвексної мінімізації числа бістатичних РЛС; б – жадібний алгоритм мінімізації функції логарифм детермінанту

На рис. 8 зображено залежність похибки локалізації цілі від кількості моностатичних РЛС з використанням алгоритмів конвексної (мінімізація максимального власного числа коваріаційної матриці похибок) та жадібної (мінімізація потенціалу фрейму та логарифму детермінанту коваріаційної матриці похибок) оптимізації. Мінімізація функції ЛД дозволяє отримати більш оптимальну топологію РЛС, ніж мінімізація функції ПФ. Крім того, результат мінімізації функції ЛД є еквівалентним до результату мінімізації функції максимального власного числа коваріаційної матриці похибок. Додатковою перевагою мінімізації функції ЛД є лінійна залежність часу розрахунку жадібного алгоритму від кількості потенційних положень РЛС.

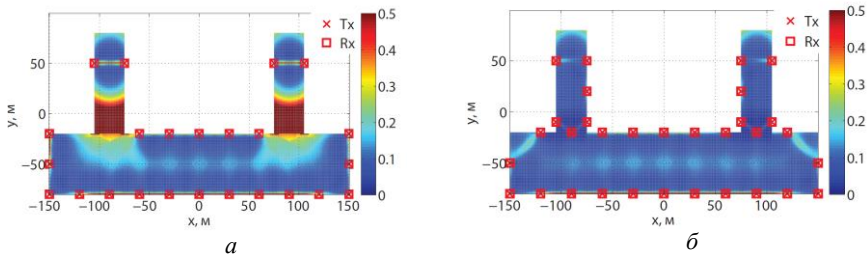


Рис. 7. Розподіл похибки локалізації цілі: а – положення РЛС, вибрані без врахування ефекту блокування сигналу; б – положення РЛС, вибрані з врахуванням ефекту блокування сигналу

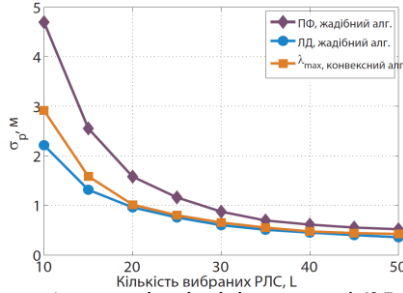


Рис. 8. Залежність похибки локалізації цілі в площині ($2D$, $K = 2$) від кількості моностатичних РЛС L , положення яких вибрано з набору $N = 117$ потенційних положень, використовуючи алгоритми оптимізації. Значення похибки локалізації цілі усереднено по $M = 171$ можливих положеннях

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу – покращення ефективності функціонування систем БПРЛС шляхом підвищення точності вимірювання кінематичних параметрів цілі з використанням вдосконаленого методу оцінки потенційної точності вимірювання параметрів цілі в БПРЛС, а також проектування систем БПРЛС шляхом використання вдосконаленого методу структурно-параметричної оптимізації окремих РЛС з метою забезпечення вимог до точності оцінки кінематичних параметрів цілі. Вдосконалені методи дозволяють врахувати характеристики зондувального сигналу та параметри оцінки відбитого сигналу, архітектуру окремих РЛС, режим прийому сигналів та параметри цілі. Виконані дослідження дозволяють сформулювати висновки та пропозиції теоретичного, методичного і прикладного характеру, основними з яких є наступні:

1. Розроблено статистичну модель оцінки точності вимірювання часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу шляхом використання властивостей функції невизначеності сигналу для радіолокаційної станції неперервної дії з лінійно-частотною модуляцією. На основі даної моделі отримано аналітичні вирази для розрахунку нижніх границь величин дисперсії оцінки даних параметрів. Вперше, окрім параметрів зондувального сигналу кожної РЛС, така модель дозволяє врахувати форму діаграми направленості антени кожної з РЛС системи. Це дозволяє використати дану модель для аналізу точності оцінки параметрів цілі в системі БПРЛС залежно від параметрів сигналу, енергетичних характеристик та форми діаграми направленості антени кожної з РЛС системи.

2. Вдосконалено метод оцінки точності вимірювання координат та вектору швидкості цілі в системі БПРЛС на основі моделі оцінки точності вимірювання часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС

неперервної дії з частотною модуляцією. Отримано аналітичні вирази для розрахунку нижніх границь величин дисперсії оцінки даних параметрів цілі в БПРЛС. Враховано також архітектуру окремих РЛС та ступінь автономності прийому сигналів при розрахунку потенційної точності оцінки параметрів цілі в системі БПРЛС. Це дозволило отримати універсальний метод для аналізу точності оцінки параметрів цілі, що може бути використаний для аналізу систем БПРЛС з різним набором параметрів, а також вдосконалений в подальшому.

3. Виконано математичне моделювання потенційної точності вимірювань параметрів цілі в системі БПРЛС залежно від ступеня автономності прийнятого сигналу, архітектури РЛС та характеристик зондувального сигналу за рахунок використання вдосконаленого методу оцінки точності вимірювання координат та швидкості цілі з метою вивчення впливу зміни даних параметрів на точність оцінки параметрів цілі. Показано, що використання кооперативного режиму прийому сигналів дозволяє підвищити потенційну точність системи до 40 % в порівнянні з автономним режимом. З'ясовано, що мережі бістатичних та моностатичних РЛС з автономним режимом прийому сигналу дають еквівалентну точність оцінки параметрів цілі.

4. Виконано математичне моделювання потенційної точності локалізації цілі залежно від параметрів оцінки відбитого сигналу в одній РЛС: час затримки сигналу, доплерівська частота та сумісне використання цих двох параметрів, з метою виявлення параметрів оцінки відбитого сигналу, що дозволяють отримати максимальну точність оцінки параметрів цілі, при заданих параметрах РЛС та системи. Показано, що точність локалізації цілі є вищою при використанні вимірювань часу затримки сигналу, ніж при використанні вимірювань доплерівської частоти. Проте, використання доплерівської частоти сумісно з вимірюваннями часу затримки сигналу в РЛС вузького діапазону (з вузькою смугою пропускання порядку 50 МГц) дозволяє підвищити точність локалізації цілі на 20–25 %. Продемонстровано можливість підвищення потенційної точності мережі активних РЛС шляхом використання ресурсів пасивних РЛС короткого діапазону дії, що полягає в сумісному використанні параметрів зондувального сигналу, виміряних з різною роздільною здатністю.

5. Для моделі нелінійних вимірювань, якою описуються БПРЛС, адаптовано три цільові функції, що є характеристиками матриці коваріацій похибок: потенціал фрейму, максимальне власне число та логарифм детермінанту. Це було зроблено шляхом лінеаризації функції, що описує сигнал лінійно-частотної модуляції, навколо кожної з точок простору вектору оцінки параметрів цілі. Адаптація цільових функцій для моделі нелінійних вимірювань дозволила застосувати алгоритм оптимізації для знаходження оптимальної топології БПРЛС, при якій задовольняються вимоги до оцінки вектору параметрів цілі в кожній з точок простору. Було вдосконалено модель, яка містить зважену інформацію, для розрахунку цільових функцій в методах оптимізації топології систем БПРЛС шляхом введення вагових

коефіцієнтів в матрицю вимірювань з метою максимізації точності оцінки вектору параметрів цілі різних модальностей. Це дозволило застосувати алгоритм оптимізації для знаходження оптимальної топології БПРЛС для моделей, в яких вектор оцінки містить параметри різних модальностей.

6. Удосконалено метод оптимізації кількості та топології РЛС системи БПРЛС з використанням виведених аналітичних виразів для розрахунку цільових функцій потенціал фрейму, максимального власного числа та логарифму детермінанту. Для даного методу було розроблено алгоритми жадібної оптимізації та розширено алгоритми конвексної оптимізації топології для систем БПРЛС, що складаються з моностатичних та бістатичних РЛС. Алгоритм жадібної оптимізації було розроблено для двох цільових функцій: потенціал фрейму та логарифм детермінанту. Для систем БПРЛС, що складаються з бістатичних РЛС, було введено ітеративне обмеження, що дозволяє вибір бістатичних пар передавач-приймач, рознесених в просторі, що задаються однаковими множинами потенційних позицій передавальних та приймальних антен. Алгоритми конвексної оптимізації було вдосконалено шляхом релаксації обмеження на матрицю вагових коефіцієнтів, що визначає вибір положень РЛС. Розроблені алгоритми дозволяють вирішити задачу вибору оптимальної топології моностатичних та бістатичних РЛС системи БПРЛС для залежно від параметрів окремих РЛС, параметрів системи та параметрів цілі. Крім того дані алгоритми можуть бути використані для проектування розширення зони дії існуючих систем БПРЛС шляхом знаходження оптимальних положень додаткових передавачів, приймачів чи пар передавач-приймач. Вдосконалені методи оптимізації моностатичних і бістатичних РЛС систем БПРЛС можуть бути використані для вирішення двох типів оптимізаційних задач: вибір фіксованої кількості РЛС, що забезпечують максимальну точність оцінки параметрів цілі; або ж вибір мінімальної кількості РЛС, що забезпечують фіксовану точність оцінки параметрів цілі.

7. Виконано математичне моделювання вдосконалених методів оптимізації кількості і топології РЛС систем БПРЛС з метою порівняння алгоритмів оптимізації з використанням різних цільових функцій. Було показано, що мінімізація цільової функції логарифм детермінанту з використанням жадібного алгоритму дозволяє отримати топологію системи БПРЛС, яка в середньому забезпечує нижчу похибку оцінки параметрів цілі в порівнянні з топологією системи, отриманою в результаті мінімізації величини максимального власного числа матриці коваріацій з використанням конвексного алгоритму. При вирішенні задачі знаходження оптимальної топології системи БПРЛС, що складається з бістатичних РЛС, жадібний алгоритм дозволяє вибір бістатичних пар РЛС, рознесених в просторі, що задаються однаковими множинами потенційних позицій передавальних та приймальних антен, на відміну від алгоритму конвексної оптимізації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ivashko I. Radar network topology optimization for joint target position and velocity estimation / I. Ivashko, G. Leus, A. Yarovoy // Elsevier Signal Processing Journal. – Vol. 130. – 2017. – P. 279–288. (Scopus)
2. Ivashko I. Sparsity-based optimization of the sensors positions in radar networks with separated transmit and receive nodes / I. M. Ivashko, O. A. Krasnov, A.G.Yarovoy // International Journal of Distributed Sensor Networks. – Vol. 12, Issue 2. – 2016. – P. 9437602:1–9437602:10. (Scopus)
3. Konchenko I. M. Influence of Multilateration Surveillance System Arrangement on the Target Localization / I. M. Konchenko, F. J. Yanovsky // Proceedings of the National Aviation University (фахове видання). – Vol. 41, Issue 4. – 2009. – P. 29–32.
4. Івашко І. Точність локалізації цілі в багатопозиційних радіолокаційних системах / І. Івашко, Ф. Яновський, // Вісник Інженерної Академії України (фахове видання). – № 2. – 2018. – С. 14–18.
5. Конченко І. Аналіз можливостей оптимального розміщення компонентів мультilaterаційної системи спостереження в аеропорту / І. Конченко, Яновський Ф. // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій (фахове видання). – Т. 8 (№ 1). – 2010. – С. 5–9.
6. Konchenko I. Availability Analysis of the Multilateration Surveillance System in Kiev (Boryspil) Airport / I. Konchenko // Proceedings of the Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2008). – K. : Sep 22–24, 2008. – P. 83–85. (Scopus)
7. Konchenko I. Multilateration surveillance system arrangement at the airport area. / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of SPIE 7745. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments. – Vol. 7745. – 2010. – P. 77451.1–77451.5. (Scopus)
8. Ivashko I. Performance analysis of multisite radar systems / I. Ivashko, O. Krasnov, A. Yarovoy // Proceedings of the 2013th European Radar Conference (EuRAD-2013). – Nuremberg, Germany. – 2013. – P. 459–462. (Scopus)
9. Konchenko I. Geometrical arrangement of multilateration surveillance system components by means of Cramer-Rao lower bound analysis / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of SPIE 7502. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments. – Vol. 7502. – 2009. – P. 7502.1–7502.8. (Scopus)
10. Ivashko I. Receivers' topology optimization of the combined active and WiFi-based passive radar network / I. M. Ivashko, O. A. Krasnov, A. G. Yarovoy // Proceedings of the 11th European Radar Conference (EuRAD 2014). – Rome, Italy. – 2014. – P. 517–520. (Scopus)
11. Ivashko I.M. Topology optimization of monostatic radar networks with wide-beam antennas / I.M. Ivashko, O.A. Krasnov, A.G. Yarovoy // Proceedings of the 12th European Radar Conference (EuRAD 2015). – Paris, France. – 2015. – P. 133–136. (Scopus)
12. Ivashko I.M. Some aspects of the multistatic radar network topology optimization / I.M. Ivashko, O.A. Krasnov, A.G. Yarovoy // Proceedings of the 17th International Radar Symposium (IRS 2016). – Krakow, Poland. – 2016. – P. 1-5. (Scopus)
13. Ivashko I. Theoretical and experimental results on recognition of polarized signal multipath propagation in secondary radar and multilateration systems / I. Ivashko, J. Gabrusenko, F. Yanovsky // Proceedings of the Microwaves, Radar and

Remote Sensing Symposium (MRRS 2011). – Kiev, Ukraine. – 2011. – P. 298-300. (Scopus)

14. Konchenko I. Multipath effect in multilateration surveillance system / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of SPIE 8008. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments. – Vol. 8008. – 2011. – P. 8008.1-8008.7. (Scopus)

15. Конченко І. Ефект багатошляхового поширення в мультilaterаційній системі спостереження / І. Конченко // Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції АВІА - 2011. – Т. 3. – К.: 2011. – С. 21.58-21.61.

16. Ivashko I.M. Off-grid radar node placement for target localization in radar networks / I.M. Ivashko, A.G. Yarvoy // Proceedings of the International Conference on Radar (2016 CIE). – Guangzhou, China. – 2016. – P. 1-4. (Scopus)

17. Konchenko I. Multilateration Surveillance System Arrangement at the Airport Area. / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of the Signal Processing Symposium. CD ROM. – Jachranka, Poland. – 2010. – P. 1–3.

18. Konchenko I. Geometrical arrangement of multilateration surveillance system components by means of Cramer-Rao lower bound analysis / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of the Signal Processing Symposium. CD-ROM. – Jachranka, Poland. – 2009. – P. 1–2.

19. Konchenko I. Optimization of Multilateration Surveillance System Arrangement at the Airport Area / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of the International Symposium «Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications» (ESAVS 2010). CD-ROM. – Berlin, Germany. – 2010. – P. 1–4.

20. Konchenko I. Multipath effect in multilateration surveillance system / I. Konchenko, F. Yanovsky // Proceedings of the Signal Processing Symposium. CD ROM. – Vilnius, Lithuania. – 2011. – P. 1-4.

21. Konchenko I. Cramer-Rao Lower Bound for localization error analysis in multilateration system / I. Konchenko // Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць. – К.: НАУ-друк. – 2009. – С. 10-13.

22. Konchenko I. Influence of signal propagation on object localization in multilateration system / I. Konchenko // Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць. К.: НАУ-друк. – 2009. – С. 29-32.

АНОТАЦІЯ

Івашко І. М. Структурно-параметрична оптимізація багатопозиційних радіолокаційних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – Навігація та управління рухом, Національний авіаційний університет, м. Київ, 2019 р.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної задачі, що полягає в покращенні ефективності функціонування БПРЛС шляхом підвищення точності вимірювання кінематичних параметрів цілі з використанням вдосконаленого методу оцінки потенційної точності вимірювання параметрів цілі в БПРЛС, а також проектування систем БПРЛС шляхом використання вдосконаленого методу структурно-параметричної оптимізації БПРЛС з метою забезпечення вимог до точності оцінки кінематичних параметрів цілі.

Отримав подальший розвиток статистичний метод оцінки потенційної точності вимірювання параметрів цілі в системах БПРЛС шляхом розробки моделі оцінки потенційної точності вимірювання часу затримки та доплерівської частоти сигналу в одній РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу; отримання математичних залежностей для розрахунку потенційної точності вимірювання кінематичних параметрів цілі в мережі БПРЛС, що складається з РЛС неперервної дії з частотною модуляцією сигналу. Подальшого розвитку набув метод оптимізації кількості і топології РЛС в системах БПРЛС за рахунок: виведення математичних залежностей для розрахунку цільових функцій потенціал фрейму та логарифм детермінанту; вдосконалення моделі, яка містить зважені параметри оцінки, для цільових функцій, які розраховуються за використанням коваріаційної матриці похибок; розробки нового алгоритму жадібної оптимізації для нелінійної моделі вимірювань; розробки нових моделі та жадібного алгоритму оптимізації топології БПРЛС, що складається з РЛС бістатичної архітектури; удосконалення алгоритмів конвексної оптимізації.

Ключові слова: багатопозиційні радіолокаційні системи, мультilateraційні системи, нерівність Крамера-Рао, випукла оптимізація, жадібний алгоритм, коваріаційна матриця похибок, багатопрохідне поширення сигналу.

АННОТАЦИЯ

Ивашко И. Н. Структурно-параметрическая многопозиционных радиолокационных систем. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.13 – Навигация и управление движением, Национальный авиационный университет, г. Киев, 2019 г.

Диссертация направлена на решение актуальной научно-практической задачи, состоящей в улучшении эффективности функционирования МПРЛС путем повышения точности измерения кинематических параметров цели с использованием усовершенствованного метода оценки потенциальной точности измерения параметров цели в МПРЛС, а также проектирование МПРЛС путем использования усовершенствованного метода структурно-параметрической оптимизации МПРЛС с целью обеспечения требований к точности оценки кинематических параметров цели.

Получил дальнейшее развитие статистический метод оценки потенциальной точности измерения параметров цели в системах МПРЛС путем разработки модели оценки потенциальной точности измерения времени задержки и доплеровской частоты сигнала в одной РЛС непрерывного действия с частотной модуляцией сигнала; получения математических зависимостей для расчета потенциальной точности измерения кинематических параметров цели в сети БПРЛС, состоящий из РЛС непрерывного действия с частотной модуляцией сигнала. Дальнейшее развитие получил метод оптимизации количества и топологии РЛС в системах МПРЛС за счет: вывода математических зависимостей для расчета целевых функций потенциал фрейма и логарифм детерминанта; усовершенствование модели, которая содержит взвешенные параметры оценки,

для целевых функций, которые рассчитываются с использованием ковариационной матрицы ошибок; разработки нового алгоритма жадной оптимизации для нелинейной модели измерений; разработки новых модели и жадного алгоритма оптимизации топологии МПРЛС, состоящей из РЛС бистатической архитектуры; усовершенствования алгоритмов конвексной оптимизации.

Ключевые слова: многопозиционные радиолокационные системы, мультilaterационные системы, неравенство Крамера-Рао, выпуклая оптимизация, жадный алгоритм, ковариационная матрица ошибок, многолучевое распространение сигнала.

ABSTRACT

Ivashko I. M. Structure and parameters optimization of the radar networks. – Qualification scientific thesis on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty – 05.22.13 "Navigation and traffic management", National Aviation University, Kyiv, 2019.

This thesis is dedicated to the development of solution for an important task of applied science. The goal of this task is an improvement of the radar networks functionality by means of increasing estimation accuracy of the target kinematic parameters using improved method of evaluation potential accuracy of target parameters estimation; and radar networks design using improved method structure and parameters optimization of radar networks with aim to provide required accuracy of target parameters estimation.

The statistical method of the evaluation of potential accuracy of kinematic target parameters estimation in radar networks was further developed by means of the development of the model of potential accuracy estimation of time delay and Doppler frequency of the signal in frequency-modulated continuous-wave radar; obtaining mathematical dependencies for evaluation of the potential accuracy of the measurement of a target kinematic parameters in the radar network that consists of FMCW radars. In the thesis, the model that contains weighted parameters, for cost functions, which are evaluated based on covariance matrix and are used in methods of radar networks topology optimization with the aim to provide maximal estimation accuracy of the target parameters of different modalities, was improved. The method of the number and topology optimization of radar networks were further developed by means of: obtaining mathematical dependencies for evaluation of the frame potential and log-determinant cost functions; improvement of the model that contains the weighted estimation parameters for the objective functions, which are evaluated based on the error covariance matrix; the development of the new algorithm of greedy optimization for non-linear measurement model; the development of the new model and greedy algorithm of topology optimization of radar networks, which consists of bistatic radars; further development of the convex optimization algorithms.

Keywords: radar networks, multilateration systems, Cramer-Rao inequality, convex optimization, greedy algorithm, error covariance matrix, multipath signal propagation.

Підп. до друку 24.04.2019. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,40. Обл.-вид. арк.1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 63-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002