

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

УДК 621.396.96

РЯБУХА ВЯЧЕСЛАВ ПЕТРОВИЧ

**ТЕОРІЯ І ТЕХНІКА ЗАХИСТУ РЛС З ПЛОСКИМИ ФАР
ВІД МАСКУВАЛЬНИХ ШУМОВИХ, ПАСИВНИХ
І КОМБІНОВАНИХ ЗАВАД НА ОСНОВІ
АДАПТИВНИХ РЕШІТЧАСТИХ ФІЛЬТРІВ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Державному підприємстві Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем "Квант-Радіолокація" Державного концерну "Укроборонпром". Дисертаційні дослідження проводились також під час роботи у Харківському національному університеті радіоелектроніки.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Леховицький Давід Ісаакович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кобзєв Анатолій Васильович,
Науковий центр Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Міністерство оборони України, провідний науковий співробітник;

доктор технічних наук, професор
Піза Дмитро Макарович,
Національний університет "Запорізька політехніка", Міністерство освіти і науки України, проректор з науково-педагогічної роботи та питань перспектив розвитку університету, директор інституту інформатики та радіоелектроніки, завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій;

доктор технічних наук, професор
Жук Сергій Якович,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Міністерство освіти і науки України, завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв і систем.

Захист відбудеться **"15" жовтня 2020** року о **13⁰⁰** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий " ___" серпня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03



В. М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. РЛС контролю повітряного простору й управління повітряним рухом розв'язують інформаційні задачі в умовах дії зовнішніх завад різної природи, зокрема, маскувальних пасивних, шумових і комбінованих завад. Вони маскують сигнали і ускладнюють тим самим добування корисної інформації. Тому захист РЛС від завад є найважливішою задачею, а їхня завадозахищеність – найважливішим тактико-технічним показником.

На практиці РЛС функціонують в умовах *апріорної невизначеності статистичних характеристик* завад, які можуть динамічно змінюватися в часі й у просторі. Тому заздалегідь спроектувати високоефективну систему завадозахисту з фіксованими параметрами, як правило, не вдається. У зв'язку із цим великий інтерес становлять *адаптивні* системи захисту від завад, які оперативно добувають інформацію про параметри завад безпосередньо із вхідних дій і змінюють свої параметри.

До перших у світовій радіолокаційній практиці адаптивних систем завадозахисту РЛС належать запропоновані на початку 60-х років минулого сторіччя Я. Д. Ширманом і С. І. Красногоровим в АРТА (м. Харків) квадратурні кореляційні автокомпенсатори завад на основі градієнтних алгоритмів адаптації [1].

За більш ніж піввіковий період суттєво розвинена теорія адаптивної обробки сигналів на фоні завад. Однак в існуючих РЛС досягнення теорії реалізовані далеко не повністю. Так, для захисту вітчизняних РЛС від шумових завад дотепер використовуються *застарілі* "градієнтні" автокомпенсатори, які часто захищаються від шумової завади, створеної тільки *одним* постановником, а від пасивних завад – *неадаптивні* системи селекції рухомих цілей (СРЦ) [1].

Таке положення можна пояснити тим, що теоретичні розробки зазвичай відповідають на запитання, "що" має відбуватися в процесі обробки сигналів на фоні завад, але не супроводжуються однозначною відповіддю на запитання, "як" їх реалізувати. Це пов'язано з тим, що вибір конкретного способу реалізації неоднозначний, часто суб'єктивний і диктується традиціями, накопиченими досвідом і знаннями розробників, а також можливостями елементної бази.

Водночас у сучасних умовах зростають вимоги до завадозахищеності радіолокаторів, що обумовлено істотним зростанням можливостей засобів повітряно-космічного нападу з постановки завад. Наприклад, безпілотні літальні апарати можуть сьогодні застосовуватися як постановники шумових завад.

Усе це обумовлює актуальність створення більш складних, ефективних і практично реалізованих у вітчизняних РЛС алгоритмів і систем завадозахисту.

При цьому доцільно використовувати плоскі ФАР із цифровою обробкою сигналів, які мають певні переваги й сьогодні є основою безлічі новітніх закордонних розробок РЛС для військових систем різного призначення.

Як адаптивні фільтри в роботі використовуються уніфіковані багатоступінчасті адаптивні решітчасті фільтри, які мають цілий ряд переваг порівняно з відомими фільтрами іншої структури.

Зазначене свідчить про існування *протиріччя* між теоретичною розробкою ефективних систем завадозахисту і можливістю їхньої практичної реалізації,

оскільки теоретично можуть бути розроблені високоефективні складні адаптивні системи, які неможливо реалізувати на практиці.

Усе це обумовлює актуальну науково-прикладну **проблему** розроблення високоефективних та швидкодіючих структур та алгоритмів адаптивних систем захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад, що забезпечує можливість їхньої практичної реалізації в РЛС різного призначення на єдиній уніфікованій основі адаптивних решітчастих фільтрів і на сучасній цифровій елементній базі.

Об'єкт дослідження — системи захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад на уніфікованій основі адаптивних решітчастих фільтрів.

Предмет дослідження — теорія адаптивної решітчастої фільтрації, структури й алгоритми систем захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад на уніфікованій основі АРФ та їх ефективність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота узагальнює результати досліджень, виконані у рамках Державної цільової науково-технічної програми щодо створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження) (постанова Кабінету Міністрів України від 17 вересня 2008 р. № 834), наукових напрямів Державного підприємства Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем "Квант-Радіолокація", Харківського національного університету радіоелектроніки, Казенного підприємства науково-виробничий комплекс "Іскра", Державного підприємства Науково-дослідний інститут "Квант", й знайшли відображення у 13 звітах про науково-дослідні, 2 звітах про науково-технічні і 4 звітах про дослідно-конструкторські роботи.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – вирішення проблеми високоефективного й швидкодіючого адаптивного захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад, що забезпечує практичну реалізованість розроблених алгоритмів і структур в РЛС різного призначення та діапазонів хвиль на єдиній уніфікованій структурно-алгоритмічній основі АРФ і сучасній цифровій елементній базі. Для її досягнення необхідно було вирішити низку науково-технічних задач:

1. Розвинути теорію адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ) і розширити можливості АРФ як єдиної структурно-алгоритмічної основи адаптивних систем захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад підвищеної ефективності для їхньої практичної реалізації у вітчизняні перспективні РЛС та РЛС, що модернізуються.

2. На основі розвинутої теорії адаптивної решітчастої фільтрації розробити і дослідити цифрову адаптивну систему одночасного захисту декількох основних каналів РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових завад (ШЗ), що створюються декількома постановниками, на основі єдиного паралельного АРФ з підвищеною ефективністю завадозахисту порівняно з адаптивними системами вітчизняних РЛС. Для виконання цього завдання потрібно:

- створити математичні моделі шумових завад і системи просторової обробки сигналів на фоні ШЗ у РЛС з плоскою ФАР;

- синтезувати структуру та алгоритм роботи адаптивної системи просторової обробки сигналів на фоні шумових завад на основі АРФ;

- порівняти ефективність розробленої системи захисту РЛС від ШЗ з

- "градієнтним" автокомпенсатором існуючих вітчизняних РЛС;

- квазіньютонівськими автокомпенсаторами на основі нерегуляризованої і діагонально регуляризованої оцінки максимальної правдоподібності кореляційної матриці ШЗ та оберненої до неї;

- створити дослідний зразок цифрової системи захисту РЛС з ФАР від шумових завад на основі АРФ на сучасній цифровій елементній базі та випробувати його;

- обґрунтувати вибір кількості, структури і місцезташування компенсаційних модулів у РЛС з плоскою ФАР при ідентичних та неідентичних характеристиках приймальних каналах (елементів, модулів ФАР та виділених основного і компенсаційних каналів) і надати відповідні практичні рекомендації.

3. Дослідити особливості і розробити новий метод вимірювання кутових параметрів прийнятих сигналів від нешумливої цілі, яка маскується зовнішніми шумовими завадами, що суттєво зменшить систематичні похибки і забезпечить порівняно низький рівень флуктуаційних помилок.

4. На основі розвинутої теорії адаптивної решітчастої фільтрації розробити цифрову адаптивну систему захисту РЛС від маскувальних пасивних завад (ПЗ) з малим інтервалом стаціонарності на базі АРФ з підвищеною ефективністю завадозахисту порівняно з неадаптивними системами вітчизняних РЛС. Для виконання цього завдання потрібно:

- синтезувати структуру адаптивної системи міжперіодної обробки (МПО) сигналів на фоні ПЗ на основі АРФ та спеціальні алгоритми настроювання його параметрів, що забезпечить високу швидкодію завадозахисту в умовах навчаючої вибірки малого об'єму;

- порівняти ефективність розробленої системи МПО сигналів з існуючими неадаптивними системами МПО вітчизняних РЛС за цифровими записами реальних пасивних завад;

- створити та випробувати дослідний зразок цифрової системи захисту РЛС з ФАР від ПЗ на основі АРФ на сучасній цифровій елементній базі та випробувати його.

5. Провести порівняльну оцінку ефективності МПО когерентної пачки радіоімпульсів на фоні пасивних завад в імпульсно-доплерівських РЛС і когерентно-імпульсних РЛС та на основі її результатів надати практичні рекомендації розробникам РЛС контролю повітряного простору та управління повітряним рухом з вибору частоти зондування в умовах дії пасивних завад.

6. Провести теоретико-експериментальну оцінку граничних можливостей систем сумісної, роздільної (послідовної) і комбінованої (на основі послідовних) просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад у когерентно-імпульсних РЛС і реальних можливостей адаптивних роздільних систем у РЛС програмного й кругового огляду та визначити потенційні втрати неоптимальної роздільної обробки порівняно з оптимальною сумісною обробкою сигналів, а також реальні втрати адаптивних роздільних систем. Створити і випробувати дослідний

зразок цифрової адаптивної системи послідовної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі АРФ та провести теоретико-експериментальну оцінку адаптивних роздільних систем, що реалізовані у вітчизняних РЛС контролю повітряного простору.

7. На основі розвинутої теорії адаптивної решітчастої фільтрації розробити адаптивну систему сумісної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі двовимірного АРФ для РЛС програмного і кругового огляду, де усунуті суттєві недоліки роздільних адаптивних систем, і дослідити її ефективність.

Методи дослідження. Основні положення, висновки і рекомендації роботи базуються на коректному використанні апробованих методів побудови складних радіолокаційних систем і їх адаптації до завад різної фізичної природи. Методами синтезу та аналізу розвинуто теорію АРФ, створено і досліджено структури й алгоритми систем захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад. Методами математичного моделювання та напівнатурного експерименту проводилися дослідження ефективності розроблених систем захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад та їхній порівняльний аналіз з іншими системами завадозахисту. Методом гідроакустичного (фізичного) моделювання оцінювався припустимий інтервал фіксації просторового вагового вектора. Метод випробувань використовувався в ході оцінки ефективності створених дослідних зразків систем завадозахисту.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі особисто здобувачем отримані такі **нові наукові** результати.

1. Розвинуто теорію адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ), а саме:

- синтезовано нові структури АРФ і визначено їх характеристики і параметри для використання в адаптивних системах захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад;
- синтезовано нові алгоритми настроювання АРФ, що забезпечують високу ефективність і швидкодію адаптивних систем завадозахисту

та розширено можливості АРФ як єдиної структурно-алгоритмічної основи адаптивних систем захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад підвищеної ефективності для їхньої практичної реалізації у вітчизняні перспективні РЛС та РЛС, що модернізуються [5–9, 21–25, 30–34, 38–42, 51, 60–73].

2. Вперше на основі розвинутої теорії адаптивної решітчастої фільтрації розроблено і досліджено цифрову адаптивну систему захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових завад на основі АРФ, відмінною рисою якої є забезпечення одночасного захисту декількох основних інформаційних каналів РЛС від дії декількох постановників завад з використанням єдиного паралельного АРФ з підвищеною ефективністю і чисельною стійкістю порівняно з відомими адаптивними системами, у тому числі, реалізованими у вітчизняних РЛС [2–11, 30, 34, 39, 42, 51, 56, 57, 60, 62], а саме:

- створено математичні моделі шумових завад і системи просторової обробки сигналів на фоні шумових завад у РЛС з плоскою ФАР;

- синтезовано структуру та алгоритм роботи адаптивної системи просторової обробки сигналів на фоні шумових завад на основі паралельного АРФ та обґрунтовано вибір її параметрів;

- створено дослідний зразок цифрової системи захисту РЛС з ФАР від шумових завад на основі АРФ на базі сучасної цифрової програмованої логічної інтегральної схеми, випробування якого підтвердили високу його ефективність;

- обґрунтовано практичні рекомендації з вибору кількості, структури та місцезостащування модулів плоскої ФАР спільної системи компенсаційних каналів з ідентичними та неідентичними характеристиками, виконання яких дозволить забезпечити ефективність захисту сукупності основних каналів РЛС від шумових завад, близькою до потенціальної.

3. Досліджено особливості вимірювання кутових енергетичних параметрів прийнятих сигналів від нешумливої цілі, яка маскується зовнішніми шумовими завадами, а саме:

- визначено статистики й умови, за якими можуть поряд із флуктуаційними виникати й систематичні похибки вимірювання;
- з використанням розробленої математичної моделі вимірювача оцінено величини флуктуаційних, систематичних й повних похибок вимірювання і надані практичні рекомендації по ситуаціях, коли доцільно і недоцільно вимірювати кутові координати цілей

та розроблено новий метод контрольного сигналу для вимірювання кутових енергетичних параметрів сигналів, відмінна особливість якого полягає в забезпеченні суттєвого зменшення систематичних похибок і порівняно низького рівня флуктуаційних похибок [12–14, 41, 43, 44, 48, 58].

4. Вперше на основі розвинутої теорії адаптивної решітчастої фільтрації розроблено високоефективну цифрову адаптивну систему захисту РЛС від маскувальних пасивних завад на основі послідовного АРФ, відмінною рисою якої є забезпечення високої швидкодії завадозахисту в умовах навчаючої вибірки малого об'єму [6, 7, 15–26, 31–38, 45, 49–53, 55, 59, 61–70, 73], а саме:

- синтезовано структуру адаптивної системи міжперіодної обробки (МПО) сигналів на фоні пасивних завад на основі АРФ;

- в алгоритм роботи синтезованої адаптивної системи МПО сигналів для підвищення швидкодії адаптації в умовах навчаючої вибірки малого об'єму введено стрічково-діагональну регуляризацію оцінки максимальної правдоподібності кореляційної матриці завад та обґрунтовано вибір її параметрів, а також запропоновано налаштувати АРФ за спеціальними алгоритмами;

- створено дослідний зразок такої системи на базі сучасного цифрового сигнального процесору, випробування якого підтвердили високу його ефективність порівняно з неадаптивними системами вітчизняних РЛС.

5. Вперше проведено порівняльну оцінку ефективності міжперіодної обробки когерентної пачки радіоімпульсів на фоні пасивних завад в імпульсно-доплерівських і когерентно-імпульсних РЛС, відмінною особливістю якої є урахування можливості накладання шарів пасивних завад з різних ділянок дальності у відповідних умовах в імпульсно-доплерівських РЛС, та на основі результатів оцінки надано практичні рекомендації розробникам РЛС контролю повітряного

простору та управління повітряним рухом з вибору частоти зондування в умовах дії пасивних завад, виконання яких дозволить забезпечити високу ефективність завадозахисту [27, 72].

6. Проведено теоретико-експериментальну оцінку граничних можливостей систем сумісної, роздільної (послідовної) і комбінованої (на основі послідовних) просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад та реальних можливостей адаптивних роздільних систем у РЛС програмного й кругового огляду, відмінною особливістю якої є визначення потенційних втрат неоптимальної роздільної обробки порівняно з оптимальною сумісною обробкою сигналів і реальних втрат адаптивних роздільних систем в умовах флуктуацій оцінки просторового вагового вектора послідовної обробки, некласифікованості навчаючої вибірки шумових і пасивних завад, а також під час фіксації просторового вагового вектора в ході компенсації шумових завад на час міжперіодної компенсації пасивних завад для виключення її небажаної міжперіодної декореляції. Створено і випробувано дослідний зразок цифрової адаптивної системи послідовної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі АРФ для РЛС програмного огляду [28, 29, 47, 54, 71].

7. Вперше на основі розвинутої теорії адаптивної решітчастої фільтрації розроблено і досліджено цифрову адаптивну систему сумісної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі двовимірного АРФ для РЛС програмного і кругового огляду, відмінною рисою якої є забезпечення ефективності завадозахисту, близької до потенційної, істотне зменшення кількості операцій комплексного множення для спрощення технічної її реалізації та усунення суттєвих недоліків роздільних адаптивних систем за рахунок використання тієї обставини, що вхідна вибірка комбінованих завад є й навчаючою, і відпадає необхідність пошуку класифікованих вибірок шумових і пасивних завад та фіксації оцінки вагового вектора просторової обробки сигналів [6, 7, 40, 57].

Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення і цінність отриманих результатів пов'язана з тим, що вперше розроблена теорія і техніка адаптивного захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад на основі адаптивних решітчастих фільтрів, що дозволяє реалізувати запропоновані високоефективні системи завадозахисту у вітчизняні РЛС.

В роботі отримано такі нові практичні результати:

- обґрунтовано практичні рекомендації з вибору кількості, структури та місцезоташування модулів плоскої ФАР спільної системи компенсаційних каналів з ідентичними та неідентичними характеристиками під час їх розташування поза й усередині основного полотна антени в умовах дії постановників шумових завад як по боковим пелюсткам діаграми спрямованості, так і в ході додаткової дії постановника по головній пелюстці;

- надані практичні рекомендації з вибору статичного і динамічного параметрів діагональної регуляризації цифрової адаптивної системи захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових завад на основі АРФ;

- створено й випробувано дослідний зразок системи адаптивного захисту радіолокаторів від шумових завад на базі паралельного АРФ із використанням

сучасної цифрової елементної бази, що дозволяє забезпечити ефективний захист РЛС від дії 1–12 постановників шумових завад;

- сформульовано практичні рекомендації з побудови вимірювача кутових енергетичних параметрів прийнятих сигналів від нешумливої цілі, яка маскується зовнішніми шумовими завадами;

- обґрунтовано практичні рекомендації з вибору параметрів комбінованої стрічково-діагональної регуляризації цифрової адаптивної системи захисту РЛС від маскувальних пасивних завад на основі АРФ;

- створено й випробувано дослідний зразок системи адаптивного захисту радіолокаторів від пасивних завад на базі послідовного АРФ із використанням сучасної цифрової елементної бази;

- надані практичні рекомендації розробникам РЛС контролю повітряного простору та управління повітряним рухом з вибору частоти зондування, тобто використання імпульсно-доплерівського або когерентно-імпульсного режимів в умовах дії пасивних завад;

- визначено верхні межі ефективності системи просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад в реальних умовах апріорної невизначеності параметрів сигналів і завад;

- визначено потенційні втрати неоптимальної роздільної просторово-часової обробки сигналів порівняно з оптимальною сумісною обробкою сигналів;

- визначено реальні втрати адаптивних роздільних систем просторово-часової обробки сигналів в умовах флуктуацій оцінки просторового вагового вектора від періоду до періоду зондування, некласифікованості навчаючої вибірки шумових і пасивних завад, а також під час фіксації просторового вагового вектора в ході компенсації шумових завад;

- створено і випробувано дослідний зразок цифрової адаптивної системи послідовної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі АРФ для РЛС програмного огляду;

- сформульовано практичні рекомендації розробникам РЛС програмного і кругового огляду з вибору параметрів цифрової адаптивної системи сумісної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі двовимірного АРФ.

Основні результати роботи впроваджуються на провідних підприємствах України з виробництва радіолокаційної техніки Державного концерну "Укроборонпром": Державному підприємстві Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем "Квант-Радіолокація" (м. Київ), Казенному підприємстві "Науково-виробничий комплекс "Іскра" (м. Запоріжжя), Державному підприємстві Науково-дослідний інститут "Квант" (м. Київ) та в навчальний процес у Харківському національному університеті радіоелектроніки.

Зокрема, результати досліджень з розроблення адаптивної системи захисту РЛС з ФАР від шумових завад на основі паралельного адаптивного решітчастого фільтра використовується при розробці нових РЛС КП "НВК "Іскра", у тому числі РЛС МР-1 (акт реалізації від 20.08.2019).

Результати розробки адаптивної системи захисту РЛС від пасивних завад на основі послідовного адаптивного решітчастого фільтра реалізується при виявленні

повітряних цілей в РЛС, що розробляються в ДП НДІ РС "Квант-Радіолокація" (акт реалізації від 02.09.2019).

Результати розробки адаптивної системи захисту РЛС від комбінованих завад на основі адаптивного решітчастого фільтра використані у ДП НДІ "Квант" при розробці технічного проекту виробу "Фенікс-У" (акт реалізації від 22.08.2019).

Результати досліджень з:

- просторової обробки сигналів на фоні шумових завад;
- часової обробки сигналів на фоні пасивних завад;
- просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад,

впроваджені в навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки і будуть використовуватися у лекційних курсах та лабораторних роботах за навчальною дисципліною "Радіоелектронні системи" (акт впровадження від 13.11.2019).

Все це дозволить суттєво покращити ТТХ вітчизняних РЛС різного призначення та діапазонів хвиль в умовах дії завад, зокрема, завадозахищеність, дальність дії і точність вимірювання координат цілей вітчизняних РЛС, а також покращити зміст навчальної дисципліни "Радіоелектронні системи".

Практичне значення отриманих результатів також визначається отриманим патентом на корисну модель "Система захисту основних (інформаційних) каналів від шумових завад" (№112834).

Практичне значення впровадження отриманих результатів пов'язане із збереженням життів військовослужбовців та цивільного населення, що знаходиться у зоні бойових дій. Нарешті таке впровадження дозволить отримати прибутки внаслідок виходу на світовий ринок радіолокаційної техніки з конкурентоспроможними вітчизняними РЛС підвищеної завадозахищеності.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, опубліковані в [3–5, 10], виконані автором особисто. У працях [1, 2, 6–9, 11–30], виконаних у співавторстві, здобувачем особисто у роботі [1] описано та систематизовано наукові дослідження методів захисту РЛС від шумових та пасивних завад на кафедрі радіолокації Воєнної інженерної радіотехнічної академії ППО ім. Л. О. Говорова; в [2] проведено математичне та гідроакустичне моделювання з оцінки інтервалу фіксації вагового вектора просторової обробки сигналів, при якому втрати якості компенсації шумових завад у послідовній системі просторово-часової обробки сигналів знаходяться у припустимих межах, відредаговано рукопис статті; в [3] отримано розрахункові співвідношення, проведено математичне моделювання і визначено величини середньоквадратичних значень флуктуаційних похибок та величини систематичних похибок вимірювання кутових координат нешумливої цілі у РЛС з ФАР під час дії зовнішніх джерел шумових завад, відредаговано рукопис статті; в [4] отримано розрахункові співвідношення та проведено математичне моделювання з аналізу потенціальної ефективності захисту від пасивних завад в імпульсно-доплерівських РЛС при накладанні "шарів" пасивних завад із різних елементів дальності, відредаговано рукопис статті; в [5] отримано розрахункові співвідношення, проведено математичне моделювання з порівняльною оцінкою граничних можливостей систем сумісної, роздільної і комбінованої просторово-

часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад; в [6] синтезовані й описані двовимірні адаптивні решітчасті фільтри (АРФ); в [7] синтезовані й описані алгоритми настроювання АРФ за коренями кореляційних матриць, що оцінюються; в [8] зроблено огляд відомих методів однорангової модифікації і описано рекурентний комбінований алгоритм оновлення параметрів АРФ; в [13] синтезовано і описано алгоритм просторової обробки сигналів на фоні шумових завад на основі паралельного АРФ, який реалізовано у дослідному зразку адаптивної системи захисту РЛС програмного огляду з ФАР від шумових завад, проведено випробування дослідного зразка, відредаговано рукопис статті; в [14] розроблено модель шумових завад з нерівномірним частотним спектром і проведено оцінку ефективності захисту РЛС від таких завад, відредаговано рукопис статті; в [15] отримано розрахункові співвідношення для аналізу впливу кінцевої розрядності фазообертачів на ефективність просторової обробки сигналів на фоні шумових завад; в [16] визначено статистики, що мають поряд із флуктуаційними, ще й систематичні похибки пеленгації нешумливої цілі в РЛС з ФАР у ході дії зовнішніх джерел шумових завад, відредаговано рукопис статті; в [17] отримано розрахункові співвідношення, проведено математичне моделювання і визначено величини середньоквадратичних значень флуктуаційних похибок та величини систематичних похибок вимірювання кутових координат нешумливої цілі у РЛС з лінійними ФАР у ході дії зовнішніх шумових джерел, відредаговано рукопис статті; в [18] розроблено й описано методику розрахунків граничних можливостей систем МПО сигналів на фоні пасивних завад; в [19] проведено математичне моделювання квазіоптимальних систем МПО сигналів; в [20] описано оптимальні структури міжперіодної обробки сигналів на фоні пасивних завад і визначено фізичний зміст операцій оптимальної міжперіодної обробки; в [21] проведено математичне моделювання з аналізу ефективності квазіоптимальних систем МПО сигналів на фоні пасивних завад; в [22] розроблено нові структури квазіоптимальних систем МПО сигналів та проведено математичне моделювання з аналізу ефективності розроблених систем МПО; в [23] розроблено стрічкову регуляризацію оцінок максимальної правдоподібності кореляційних матриць завад, проведено математичне моделювання з порівняльного аналізу адаптивної системи зі стрічково-діагонально регуляризованою матричною імпульсною характеристикою з іншими адаптивними системами; в [25] проведено порівняння характеристик виявлення штатної й оптимальної систем МПО сигналів з попачковою вобуляцією інтервалів зондування; в [26] розраховано статистичні характеристики виявлення сигналів на фоні пасивних завад при "укороченій" стратегії прийняття рішень в РЛС з попачковою вобуляцією інтервалів зондування, відредаговано рукопис статті; в [27] проведено експериментальні дослідження систем СРЦ на основі АРФ; в [28] розроблено метод квазіоптимального розподілу енергетичних ресурсів багатофункціональної РЛС в умовах дії завад; в [29] розроблено структуру системи захисту декількох основних (інформаційних) каналів від шумових завад на основі єдиного АРФ; в [30] описано структуру й алгоритм системи часової обробки сигналів на фоні пасивних завад на основі АРФ, який реалізовано у дослідному зразку адаптивної системи захисту РЛС від пасивних завад, проведено випробування дослідного зразка, відредаговано рукопис статті.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на 31 наукових конференціях і форумах: 15th International Radar Symposium IRS 2014, Gdansk, Poland, June 16-18, 2014 [31, 32]; 16th International Radar Symposium IRS 2015, Dresden, Germany, June 24-26, 2015 [33]; 10th International Conference, Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010), Lviv–Slavske, February 23-27, 2010 [34]; 3rd Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2011), Kiev, August 25-27, 2011 [35–37]; First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCO-2017), Kyiv, 29 May–02 June, 2017 [38]; 3rd, 9th, 10th, 11th International Conference on Antenna Theory and Techniques, (ICATT'99) Sevastopol, September 8-11, 1999 [43], (ICATT 2013) Odessa, September 16-20, 2013 [39], (ICATT-2015) April 21-24, Kharkiv [40, 41], 2015, (ICATT-2017) May 24-27, Kyiv, 2017 [42]; 1-й, 4-й, 5-й, 6-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2002), Харьков, 8-10 окт. 2002 [44]; (МРФ-2008), Харьков, 22-24 окт. 2008 [45, 46]; (МРФ-2011), Харьков, 18-21 окт. 2011 [47]; (МРФ-2014), Харьков, 14-17 окт. 2014 [48–51]; (МРФ-2017), Харьков, 24-26 окт. 2017 [52]; XI, XII, XIII, XIV, XV, XVII, XVIII международная научно-практическая конференция "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2010), Одесса, 24-28 мая 2010 [53]; (СИЭТ-2011), Одесса, 23-27 мая 2011 [54]; (СИЭТ-2012), Одесса, 4-8 июня 2012 [55, 56]; (СИЭТ-2013), Одесса, 27-31 мая 2013 [57]; (СИЭТ-2014), Одесса, 26-30 мая 2014 [58]; (СИЭТ-2016), Одесса, 23-27 мая 2016 [59]; (СИЭТ-2017), Одесса, 22-26 мая 2017 [60]; VII, VIII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", Запоріжжя, 17-19 вересня 2014 [61]; Запоріжжя, 21-23 вересня 2016 [62, 63]; Міжнародний Форум "Kharkiv-IT" [64], Харків, 28 листопада 2013; Международная научная конференция "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" (ИРЭМВ-2009), Таганрог, 27 июня-01 июля 2009 [65, 66]; XVI, XX Международная научно-техническая конференция "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC*2010), г. Воронеж, 13-15 апреля 2010 [67]; (RLNC*2014) Воронеж, 15-17 апреля 2014 [68]; 4-я Всероссийская конференция "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 15-19 ноября 2010 [69, 70]; V, VI, VII Міжнародна науково-практична конференція "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки", Київ, 11-12 жовтня 2017 [71]; Київ, 11-12 жовтня 2018 [72]; Київ, 11-12 жовтня 2019 [73].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 606 сторінках машинописного тексту, складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 9 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 311 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 21 таблицями та 271 рисунком. Список використаних джерел містить 396 найменувань, з них 262 кирилицею та 134 латиницею.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у розділі монографії, 28 статтях (з них 24 – у науково-технічних журналах, включених до переліку Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки, 4 – у зарубіжних науково-технічних журналах, які індексовані наукометричною базою "Scopus"), патенті на

корисну модель, а також у 43 доповідях і тезах доповідей у збірниках наукових праць наукових конференцій (12 індексовані НМБ "Scopus"), 13 звітах про НДР, 2 звітах про НТР і 4 звітах про ДКР.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується вибір теми дослідження і її актуальність, вказується зв'язок дисертаційної роботи з Державною цільовою науково-технічною програмою щодо створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами та науковими напрямками ДП НДІ РС "Квант-Радіолокація" та ряду інших підприємств Державного концерну "Укроборонпром" і Харківського національного університету радіоелектроніки, а також мета, завдання і методи дослідження, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наводяться анотований опис змісту розділів, відомості про апробацію, публікації та впровадження результатів, особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено розробленню адаптивної системи захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових завад на основі АРФ і її порівняльному аналізу з відомими адаптивними системами [2–9, 11, 30, 34, 39, 51, 57, 60, 62].

Розглядаються прямошумові завади, які створюються *точковими* за простором джерелами неперервних шумових випромінювань і виявляють найбільш сильну маскувальну дію.

Для синтезу і аналізу ефективності адаптивних систем розроблено математичні *моделі* шумових завад (ШЗ) таких видів:

- з рівномірним частотним спектром, взаємнокорельованих і корельованих від різних джерел;
- з нерівномірним частотним спектром;

та модель системи просторової обробки сигналів на фоні шумових завад в РЛС з плоскими ФАР [2, 3].

З використанням розроблених моделей отримано кількісні оцінки ефективності відомих кореляційних градієнтних і квазіньютонівських автокомпенсаторів [4, 5].

Системи завадозахисту настраювалися за *класифікованою* навчаючою вибіркою, породженою тільки шумовою завадою (без корисних сигналів), що складається із $K \cdot M$ – вимірних навчаючих векторів комплексних амплітуд завади. Величину K називають *об'ємом* навчаючої вибірки.

Швидкодія адаптивних систем завадозахисту визначалася за *енергетичним критерієм* Рида–Маллета–Бренанна (РМБ), під яким розуміють об'єм вибірки K , за якого середні втрати вихідного відношення сигнал/(завада + шум) $\hat{\chi}(K) = \hat{\mu}(K) / \mu$ адаптивної обробки ($\hat{\mu}(K)$) в умовах параметричній апріорній невизначеності порівняно з оптимальною (μ) у гіпотетичній ситуації точно відомої кореляційної матриці (КМ) завад не перевершують заданого рівня, в роботі –3 дБ.

Відносно прості кореляційні автокомпенсатори (АК) із *градієнтними* алгоритмами налаштування (градієнтні АК) засновані на пошуку центру поверхні рівня за допомогою так званого "методу спуску". Вони у свій час знайшли широке застосування на практиці, а у вітчизняних РЛС використовуються дотепер [1].

В ході досліджень отримано модифікований алгоритм адаптивного настроювання такого цифрового АК, де відсутнє "самозбудження" порівняно з відомими [4]. Однак і йому, як підтвердили результати математичного моделювання [4], властивий *суттєвий недолік* "градієнтних" АК – *низька швидкодія* в складній завадовій обстановці. Так, відповідно до енергетичного критерію швидкодії РМБ у ході дії чотирьох і більше постановників ШЗ, для доведення втрат відношення сигнал/(завада + шум) до рівня 3 дБ об'єм навчаючої вибірки збільшується на кілька порядків порівняно з випадком дії одного постановника. Тому сьогодні він не може використовуватися у вітчизняних РЛС.

Розглянуто структури й алгоритми роботи *квазіньютонівських* АК, що засновані на пошуку центру поверхні рівня за допомогою квазіньютонівських методів відшукання екстремумів функцій багатьох змінних. В ході побудови таких АК використовується отримана Ридом, Маллетом і Бреннаном у 1974 р. оцінка максимальної правдоподібності (МП оцінка) кореляційної матриці (КМ) гауссових ШЗ загального виду (див. нижче формулу (3)). Ця оцінка є базовою для рекурентних оцінок обернених матриць і вагових векторів у квазіньютонівських АК з рівноцінними каналами, які всі регулюються, або з виділеним основним каналом, який не регулюється.

Як підтвердили результати математичного моделювання [5], швидкодія більш складних квазіньютонівських АК, що засновані на МП оцінці КМ завад загального виду, *не залежить від степеня складності* завадової обстановки, а визначається приблизно подвоєною кількістю керованих просторових приймальних каналів, що суттєво вище, ніж у градієнтних АК. Результати моделювання також показали, що різниця у швидкодії й ефективності у сталому режимі під час дії некорельованих і сильнокорельованих шумових завад від різних зовнішніх джерел з рівномірним і нерівномірним частотним спектром нехтовно мала [2].

Недолік таких квазіньютонівських АК полягає в неможливості адаптуватися до набору навчаючих вибірок об'єму, рівного кількості керованих приймальних каналів. Тому ефективна адаптація можлива тільки у відносно малоканалних системах обробки, за малої кількості джерел шумових завад.

Цей недолік усувається в алгоритмі адаптації квазіньютонівського АК на основі запропонованої Ю.І. Абрамовичем у 1981 р. *діагональної регуляризації* МП оцінки кореляційної матриці завад (див. нижче формулу (4)), де вводилася додаткова матриця–регуляризатор $\beta_0 \mathbf{I}$ зі статичним параметром регуляризації $\beta_0 = \beta_{0st}$. При відповідному виборі параметра β_0 така оцінка може підвищити швидкодію адаптивної обробки. Так, як підтвердило моделювання [5], швидкодія адаптації визначається подвоєною кількістю постановників завад, а адаптація починається вже з першої навчаючої вибірки.

В ході досліджень поряд зі статичним параметром регуляризації β_{0st} , тобто незмінним в ході оцінювання КМ, було введено динамічний параметр регуляризації $\beta_0 = \beta_{0dyn}(K) = \beta_{0st} / K$ [20, 70], тобто мінливий на кожному кроці адаптації, і проведено порівняльний аналіз ефективності використання статичного і динамічного параметрів регуляризації. На основі цього аналізу сформульовано такі *практичні рекомендації* з вибору параметра діагональної регуляризації:

✚ параметр регуляризації можна *рівноцінно* вибрати або статичним, або динамічним, які при правильному їхньому виборі забезпечать швидкодію адаптації, що відповідає теоретичній;

✚ за *малої* кількості компенсаційних каналів необхідно вибрати *малі* значення статичного параметра регуляризації, а за *великої* їхньої кількості – *великі* значення;

✚ не допускати значень параметра регуляризації менших, ніж рівень внутрішнього шуму й не перевищувати очікуваної величини відношення завада/шум;

✚ аналогічно слід вибрати й значення динамічного параметра регуляризації, але з урахуванням ділення на величину об'єму вибірки K .

Переваги квазіньютонівських АК, робота яких заснована на використанні явно обчислених оцінок кореляційних матриць, або обернених до них, можуть виявитися нереалізованими на практиці. Причиною може бути типова для реальних умов погана обумовленість цих явно сформованих оцінок, яка характеризує точність розв'язку задачі, що за неминучою кінцевою розрядністю обчислень може призводити до *великих похибок* в оцінених значеннях вагових векторів і вихідних ефектів, що, у свою чергу, знижує ефективність адаптації.

Цей недолік суттєво послаблюється в *адаптивних решітчастих фільтрах* (АРФ), де замість явно сформованих оцінних кореляційних матриць і матриць, обернених до них, використовуються факторизовані їхні подання – у вигляді добутку слабкозаповнених матриць різної структури.

Решітчасті фільтри (РФ) були вперше запропоновані Дж.П. Бергом та Ітакурою і Саїто. У них реалізовувався швидкий алгоритм Н. Левінсона обернення симетричних трьохпліцевих матриць для задач спектрального аналізу. Д. І. Леховицьким було отримано "узагальнений алгоритм Левінсона" для довільних дійсних і комплексних КМ і розширена галузь використання АРФ.

На основі узагальненої факторизації Левінсона будується багатоступінчастий *паралельний АРФ* (рис. 1, а) з набору елементарних решітчастих фільтрів (ЕРФ) – двовходових вагових суматорів з перехресними зв'язками (рис. 1, б) [5, 6]. На рис. 1, а матриці \mathbf{H} і \mathbf{N} – *нижні трикутні* матриці розкладання Холецького матриці $\Psi = \Phi^{-1}$, оберненої до кореляційної Φ (рис. 2).

Більш простіший *послідовний АРФ* побудовано з таких самих ЕРФ (рис. 1, в).

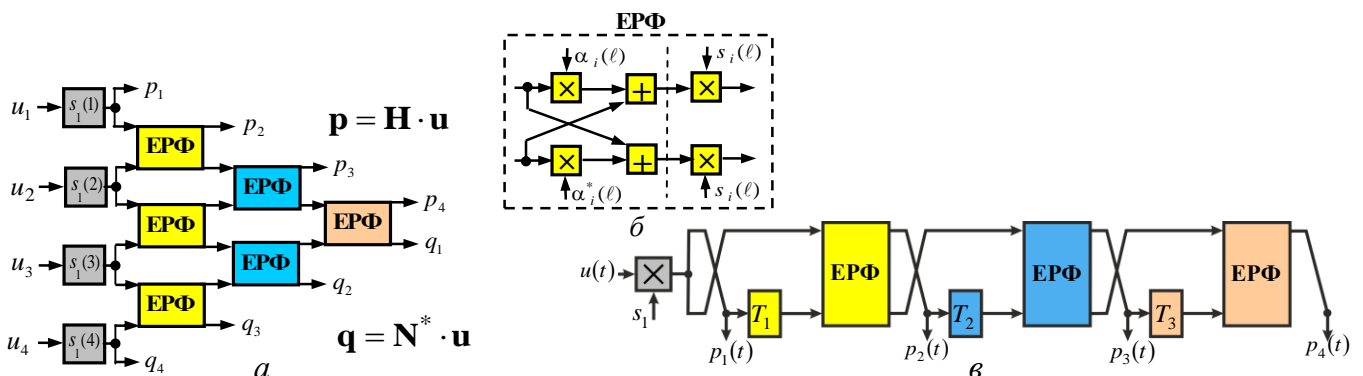


Рисунок 1 – Паралельний (а) і послідовний (в) АРФ та елементарний РФ (б)

$$\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H} = \mathbf{\Psi} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{N}^*$$

Рисунок 2 – Трикутні верхньо-нижнє й нижньо-верхнє розкладання матриці Ψ

АРФ формує різні функції матриці, оберненої до кореляційної матриці завади, заданої у факторизованій формі, що вирішує різні завдання адаптивної обробки сигналів, без її явного формування. Це обумовлює ряд таких переваг АРФ:

- ✓ універсальність обробки сигналів;
- ✓ підвищена стійкість при обмеженій розрядній сітці;
- ✓ простота урахування й використання можливої апріорної інформації про специфіку структури кореляційної матриці для підвищення швидкодії адаптації.

У ході досліджень було розвинуто теорію адаптивних решітчастих фільтрів, зокрема, синтезовані нові структури і алгоритми настроювання АРФ і розширені

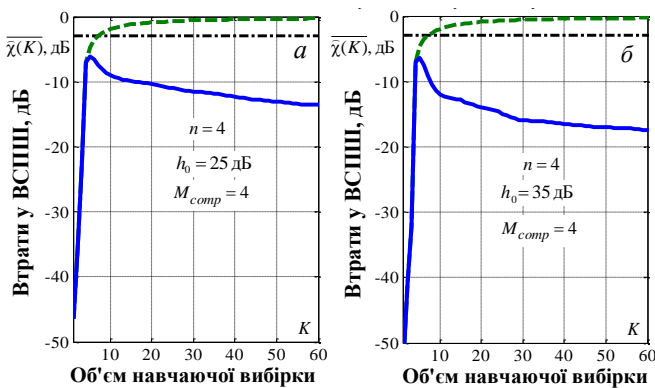


Рисунок 3 – Виграші АРФ (штрихові криві) порівняно з квазіньютонівським АК (суцільні)

їхні можливості як єдиної структурно-алгоритмічної основи адаптивних систем захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад підвищеної ефективності для їхньої практичної реалізації у вітчизняні РЛС.

Проведений порівняльний аналіз [5, 39, 57] показав повну еквівалентність ефективності АРФ і квазіньютонівських АК в умовах практично необмеженої (подвійної) розрядній сітці. Однак при реально кінцевій (одинарній) розрядності обчислень така еквівалентність порушується й відмінності між ними на користь АРФ можуть збільшуватися в міру зростання

інтенсивності зовнішніх завад і об'єму навчальної вибірки. Так, у наведеному ілюстративному прикладі при об'ємі навчальної вибірки $K = 60$ *виграш* АРФ становить приблизно 13 дБ в умовах рис. 3, а й близько 18 дБ в умовах рис. 3, б.

У ході досліджень було синтезовано нову структуру одночасного захисту сукупності основних інформаційних каналів від шумових завад, що створюються декількома постановниками на основі *одного* паралельного АРФ

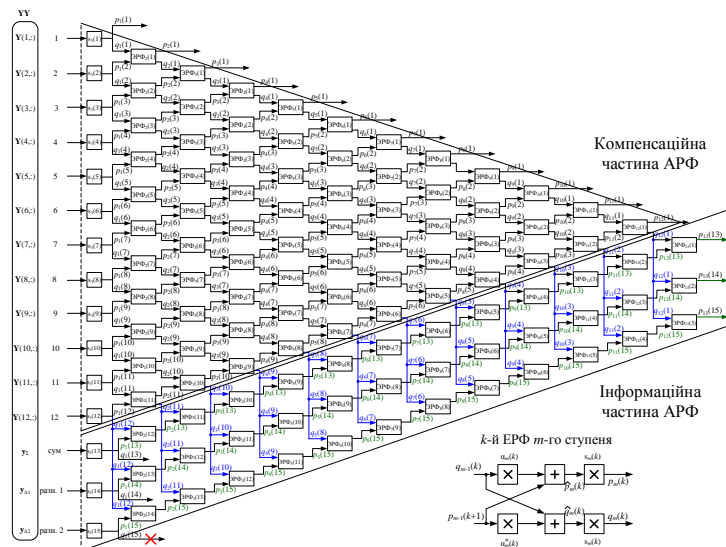


Рисунок 4 – Система захисту РЛС від шумових завад (рис. 4) [9], на яку отримано патент [30].

Синтезований новий алгоритм роботи адаптивної системи передбачає формування вагових векторів \mathbf{r} як останніх нижніх строк нижньої трикутної матриці \mathbf{H} (рис. 2) розкладання Холецького матриці, оберненої до кореляційної [9]:

$$\mathbf{r}^{(M)*} = [\mathbf{k}^*, 1] = \frac{1}{h_{M,M}} \cdot [\mathbf{e}_M^*, \mathbf{0}_M^*] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{(M \times M)} \\ \mathbf{N}_{(M \times M)}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{h_{M,M}} \cdot \mathbf{hp}^{(M)*}, \quad (1)$$

$$\mathbf{hp}^{(M)*} = \mathbf{e}_M^* \cdot \mathbf{H}_{(M \times M)}, \quad \mathbf{e}_M^* = [0 \ 0 \dots 0 \ 1].$$

З використанням розробленої структури (рис. 4) й алгоритму (1) було створено дослідний зразок цифрової системи захисту 3-х інформаційних каналів РЛС з плоскою ФАР від 1–12 постановників шумових завад на основі 15-входового 13-ступеневого паралельного АРФ на базі програмованої логічної інтегральної схеми Virtex 7 (рис. 5) [9, 51, 60]. Результати випробувань дослідного зразка ілюструються (рис. 6) видом екрана індикатора кругового огляду (ІКО) РЛС до (а) і після (б) компенсації шумових завад від $n = 10$ постановників ("сире відео"). Видно, що при виключеній системі захисту (а) шумові завади маскують корисні сигнали, тоді як після її включення (б) відмітки повітряних цілей впевнено виявляються.



Рисунок 5 – Дослідний зразок

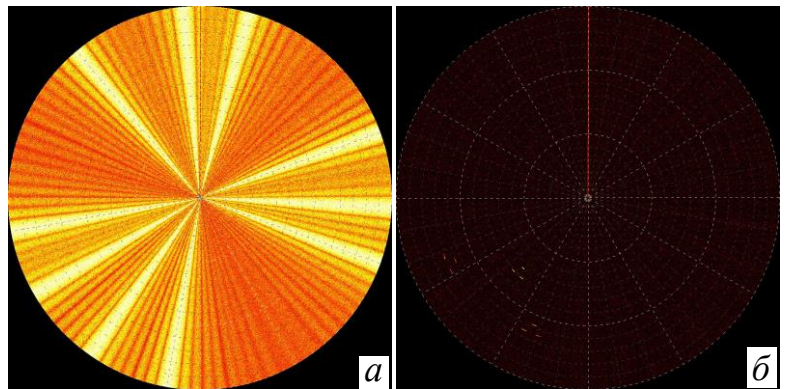


Рисунок 6 – Екран ІКО до (а) і після компенсації (б)

Результати випробувань дослідного зразка за цифровими записами реальних ШЗ також показали *істотний вииграш в ефективності* завадозахисту порівняно зі штатним градієнтним АК, який склав від 3 до 15 дБ [9].

Все це дозволяє рекомендувати розроблену адаптивну систему захисту РЛС від шумових завад на основі паралельного АРФ для виявлення цілей у вітчизняних перспективних РЛС або РЛС, що модернізуються.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню практичних рекомендацій з побудови спільної системи компенсаційних каналів для захисту сукупності основних каналів РЛС з плоскими ФАР від шумових завад [3, 10, 42, 56].

Під час просторової обробки сигналів в адаптивній системі з рівноцінними регульованими каналами РЛС з плоскими ФАР розмірність вагового вектора $\mathbf{r} = \Psi \cdot \mathbf{x}$ ($\Psi = \Phi^{-1}$ – матриця, обернена до КМ Φ ; \mathbf{x} – вектор очікуваного сигналу) може становити сотні – тисячі, що занадто складно для практичної її реалізації.

Одним зі способів зменшення такої розмірності є виділення основного і компенсаційних каналів. Для опису такого виділення було введено матрицю лінійного перетворення \mathbf{B} [10]. Якщо вона невироджена і квадратна, то вихідний

ефект систем просторової обробки сигналів без виділення $p = (\Psi \cdot \mathbf{u})^* \cdot \mathbf{x}$ і при виділенні $p_B = (\Psi_B \cdot \mathbf{u}_B)^* \cdot \mathbf{x}_B$ каналів збігаються

$$p_B = (\Psi_B \cdot \mathbf{u}_B)^* \cdot \mathbf{x}_B = \mathbf{u}^* \cdot \mathbf{B}^* \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot \Psi \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{x} = (\Psi \cdot \mathbf{u})^* \cdot \mathbf{x} = p, \quad (2)$$

що означає відсутність енергетичних втрат. Тут $\mathbf{u}_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}$, $\mathbf{x}_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}$ – перетворені вектори вхідних дій та очікуваного сигналу; $\Psi_B = \Phi_B^{-1} = \mathbf{B}^{*-1} \cdot \Psi \cdot \mathbf{B}^{-1}$ – матриця, обернена до перетвореної кореляційної матриці завад $\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \Phi \cdot \mathbf{B}^*$.

Однак таке виділення каналів не зменшує розмірність вагового вектора в цілому, а лише на одиницю зменшує кількість регульованих каналів, що практично не спрощує технічну реалізацію просторової обробки. Очевидно, що зменшити розмірність вектора можна використанням прямокутної матриці перетворення \mathbf{B} , що, через невиконання рівності (2), призведе до енергетичних втрат.

Для розв'язання такого протиріччя було досліджено можливість зменшення кількості компенсаційних каналів так, щоб при незначних енергетичних втратах така кількість була істотно менше загальної кількості модулів ФАР, що формують кожний з основних каналів.

На основі аналізу результатів досліджень ефективності системи компенсаційних *ідентичних* модулів, що розташовані *усередині* (рис. 7, б–е) і *поза* (рис. 7, а) основним полотном плоскої ФАР під час дії джерел ШЗ по *бічним* (рис. 7, а–з) пелюсткам ДС зі зважуванням (рис. 7, в) й без зважування (рис. 7, з) вихідних сигналів модулів ФАР, а також у більш складній ситуації додаткової дії джерела ШЗ по *головній* пелюстці (рис. 7, д, е) було обґрунтовано такі *практичні рекомендації* про розміщення компенсаційних модулів, амплітудний розподіл сигналів на апертурі плоскої ФАР, та вибір кількості компенсаційних каналів [10, 42, 56]:

- компенсаційні модулі рекомендовано розносити як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах ФАР;
- розташування компенсаційних модулів усередині або поза основною апертурою ФАР через незначні відмінності в ефективності може визначатися технологічними або вартісними міркуваннями;
- "зважувати" вихідні сигнали модулів або елементів ФАР можна рівноцінно як за законом Тейлора, так і Хеммінга, які аналізувалися;
- з погляду захисту РЛС від шумових завад більш переважно застосовувати рівномірний амплітудний розподіл сигналів на апертурі плоскої ФАР;
- за ідентичними приймальними каналами в умовах дії джерел шумових завад (ДШЗ) по бічних пелюстках ДС плоскої ФАР рекомендовано вибирати кількість компенсаційних модулів рівною максимальній очікуваній кількості ДШЗ, що дозволить забезпечити майже повне заглушення зовнішніх ШЗ і суттєво зменшити кількість компенсаційних каналів порівняно з кількістю модулів ФАР, що формують основний канал;
- в ході додаткової дії джерела ШЗ в області головного променя ДС ФАР кількість компенсаційних модулів слід вибирати в 3–4 рази більшою, ніж максимально очікувана кількість ДШЗ за малих розмірах модулів і в 2–3 рази більшою – за великих модулів.

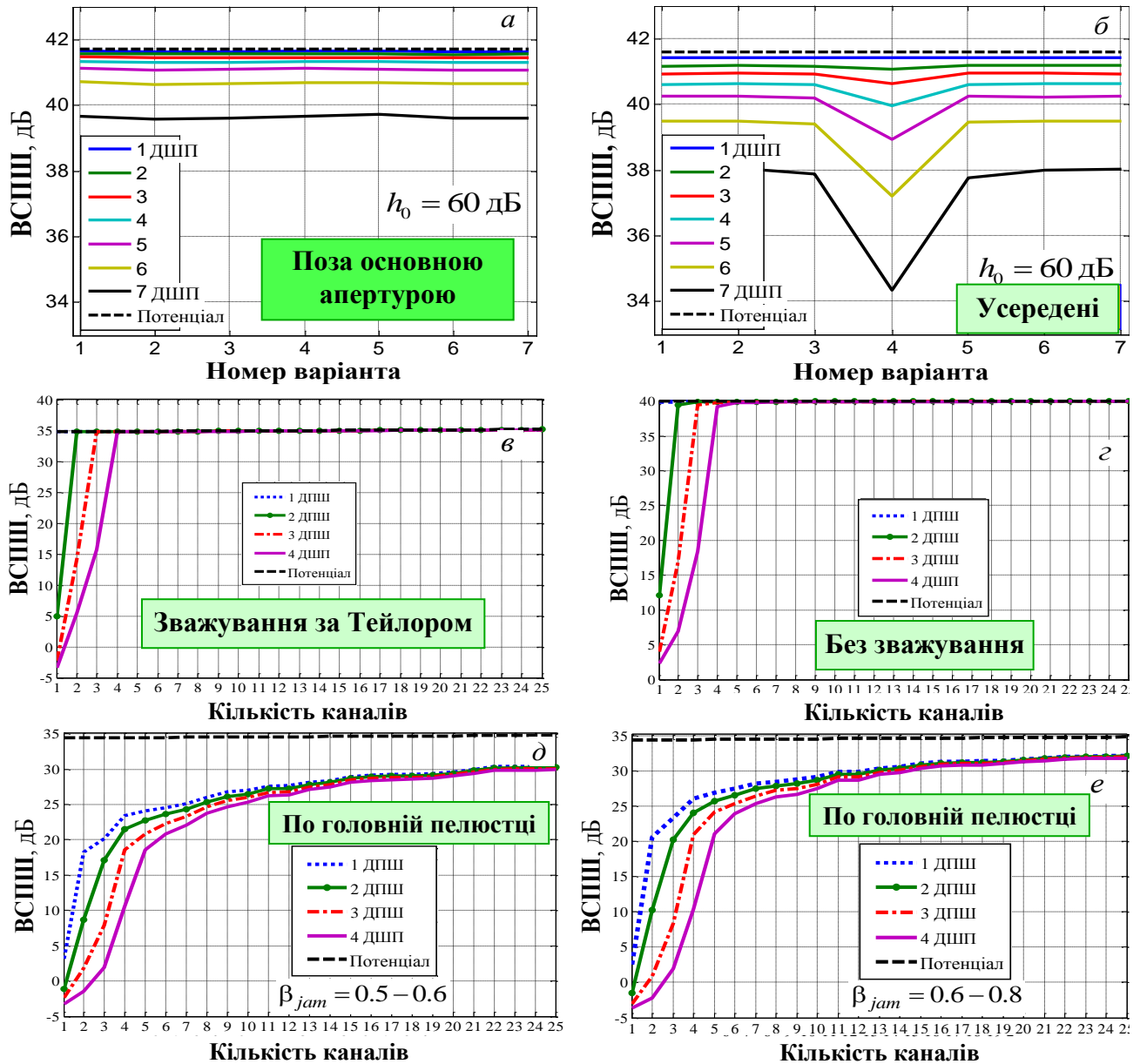


Рисунок 7 – Ефективність ідентичних компенсаційних каналів

Неідентичності характеристик каналів приймання *декорелюють* прийняті зовнішні шумові завади. Вони враховувалися шляхом поелементного перемноження кореляційної матриці завад на матрицю неідентичностей [3].

Розглядалися відмінності амплітудно-частотних (АЧХ) і фазочастотних (ФЧХ) характеристик приймачів, що встановлені

- ❖ на виходах антенних елементів активної ФАР (АФАР) (рис. 8, а);
- ❖ на виходах антенних модулів ФАР (рис. 8, б);
- ❖ на виходах основного і компенсаційних каналів (рис. 8, в)

при типових середньоквадратичних відхиленнях амплітуди й фази.

Неідентичності приймачів суттєво зменшують коефіцієнт заглушення ШЗ. При установці приймачів на виходах антенних елементів АФАР або модулів ФАР, збільшення кількості компенсаційних каналів порівняно з кількістю джерел ШЗ практично не поліпшує якість заглушення завади, що потребує забезпечення досить високого ступеня ідентичності АЧХ і ФЧХ приймачів. При їх установці на виходах основного і компенсаційних каналів таке поліпшення суттєве (рис. 8, в).

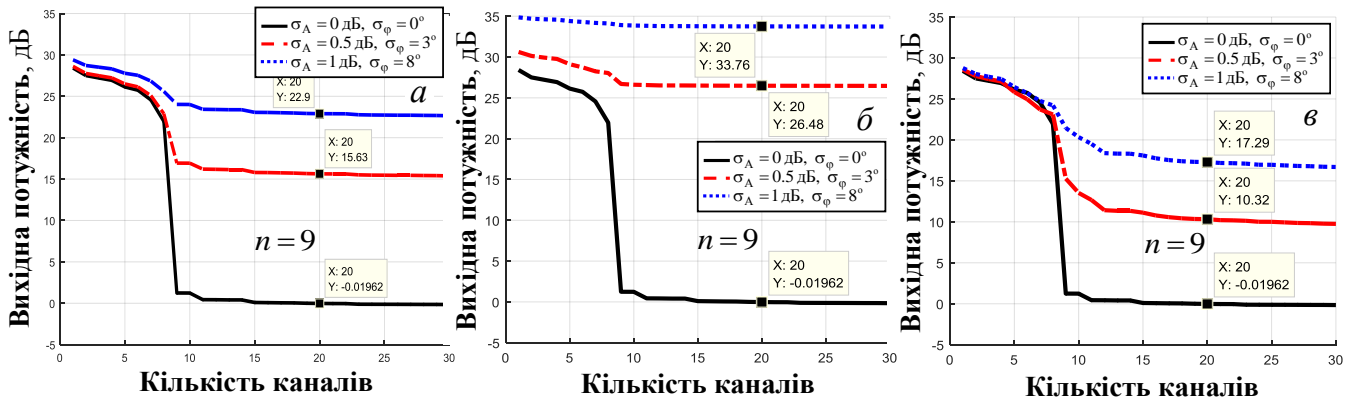


Рисунок 8 – Ефективність неідентичних компенсаційних каналів

Таким чином, практична *рекомендація*: в умовах неідентичних приймачів їх доцільно встановлювати на виходах основного й компенсаційних каналів, кількість яких має бути у 2–3 рази більшою порівняно з кількістю n джерел ШЗ (рис. 8, в).

Третій розділ присвячено дослідженню особливостей *вимірювання* кутових координат нешумливої цілі, що прикривається зовнішніми шумовими завадами, та розробці нового методу вимірювання кутових параметрів прийнятих сигналів [12–14, 41, 43, 44, 48, 58].

Проведено порівняльний аналіз алгоритмів, які найчастіше використовуються для поточного вимірювання кутових параметрів, але в умовах, коли діють шумові завади й кутовий параметр сигналу набуває енергетичний характер.

Для цього була створена математична модель, що дозволяє досліджувати флуктуаційні, систематичні і повні похибки вимірювання кутових координат цілі.

Аналітично і методом математичного моделювання показано, що для випадків, коли одне джерело шумових завад і ціль розташовані в межах головної пелюстки ДС або декілька джерел діють по бічних пелюстках, але розподілені несиметрично щодо нормалі до ФАР, поряд із флуктуаційною може виникати й систематична похибка пеленгації нешумливої цілі, тобто зміщення статистики (рис. 9, а) [12–14].

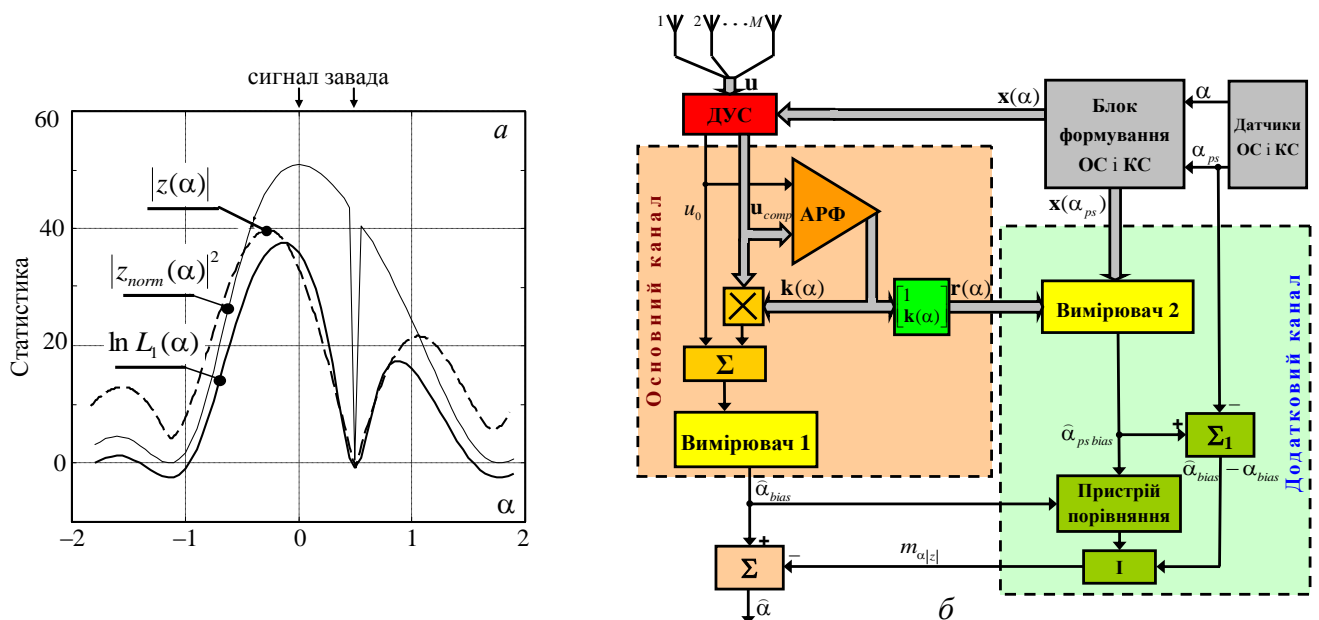


Рисунок 9 – Залежності статистик від напрямку приходу очікуваного сигналу і вимірювач кутового параметру з компенсацією систематичної похибки

Дослідження показали, що незміщена статистика має найбільшу, а найбільш зміщена статистика – найменшу дисперсію флуктуаційних похибок [12–14, 41, 43].

Для зменшення систематичних похибок і забезпечення відносно низького рівня флуктуаційних похибок вимірювання кутових параметрів розроблено новий *метод контрольного сигналу* [44]. Використовуючи контрольний сигнал, визначається величина систематичної похибки вимірювання (рис. 9, б), а як статистику рекомендовано використовувати таку, що має найменшу дисперсію флуктуаційних похибок.

Четвертий розділ присвячено розробленню адаптивної системи захисту РЛС від маскувальних пасивних завад на основі АРФ для її технічної реалізації у вітчизняних РЛС [6, 7, 15–26, 31–38, 45, 49–53, 55, 59, 61–70, 73].

Під маскувальними пасивними завадами (ПЗ) розуміють відбиття зондувального сигналу РЛС від джерел, що заважають: земної і морської поверхні, місцевих предметів, гідрометеорів (туману, дощових або грозових хмар, дощу, снігу, граду) і штучних диполів у кожному елементі розділення за дальністю у заданому кутовому напрямку в M суміжних інтервалах зондування.

Для завдання різноманітних пасивних завад з довільною шириною спектра й розташуванням на частотній осі використовувалася їхня апроксимація процесами авторегресії різного цілого порядку $p \geq 1$ [15].

Важлива властивість авторегресійних пасивних завад (АР ПЗ) полягає в тому, що матриця, обернена до кореляційної, є стрічковою із шириною стрічки $zz = 2p + 1$.

Значущість цієї властивості обумовлена тим, що вона дозволила ввести для підвищення швидкодії адаптації нову так звану *стрічкову регуляризацию* оцінки максимальної правдоподібності КМ завад і визначити граничну кратність компенсації АР ПЗ, збільшення якої не підвищує ефективність обробки [6, 7, 20, 70].

Аналіз цифрових записів реальних пасивних завад показав істотну нерівномірність (нестационарність) їх дальнісних розподілів, що обумовлює малий об'єм навчаючої вибірки для настроювання адаптивного фільтра і підкреслює актуальність забезпечення високої швидкодії адаптації.

За критерієм енергетичної швидкодії проведено порівняльний аналіз різних оцінок матриці, оберненої до кореляційної матриці пасивних завад (рис. 10), а саме:

1⁰. Оцінки $\hat{\Psi} = \hat{\Phi}^{-1}$, оберненої до МП оцінки кореляційної матриці завад

$$\hat{\Phi} = [\hat{\Phi}_{ij}]_{i,j=1}^M = K^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^* = K^{-1} \cdot \sum_{i=1}^K \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^* \quad (3)$$

2⁰. Оцінки $\hat{\Psi}_{dl} = \hat{\Phi}_{dl}^{-1}$, оберненої до діагонально регуляризованої (diagonally loaded) МП оцінки кореляційної матриці завад

$$\hat{\Phi}_{dl} = \beta_0 \cdot \mathbf{I}_M + \hat{\Phi}, \quad \beta_0 > 0. \quad (4)$$

3⁰. Стрічкової (*band*) "максимально ентропійної" апроксимації оцінки ермітової $M \times M$ оберненої матриці [6, 7, 20, 70]

$$\hat{\Psi} = \hat{\Psi}_b = \mathbf{H}_b^* \cdot \mathbf{H}_b = \mathbf{N}_b \cdot \mathbf{N}_b^*, \quad (5)$$

де \mathbf{H}_b й \mathbf{N}_b – її нижні трикутні стрічкові $M \times M$ матриці-співмножники розкладання Холецького.

4⁰. Стрічково-діагональної (*band-diagonal*) апроксимації оцінки ермітової $M \times M$ оберненої матриці [6, 7, 20, 70]

$$\hat{\Psi} = \hat{\Psi}_{bd} = \mathbf{H}_{bd}^* \cdot \mathbf{H}_{bd} = \mathbf{N}_{bd} \cdot \mathbf{N}_{bd}^*, \quad (6)$$

і визначено, що для підвищення швидкодії адаптації доцільно в АРФ використовувати запропоновану комбіновану *стрічково-діагональну* регуляризацію.

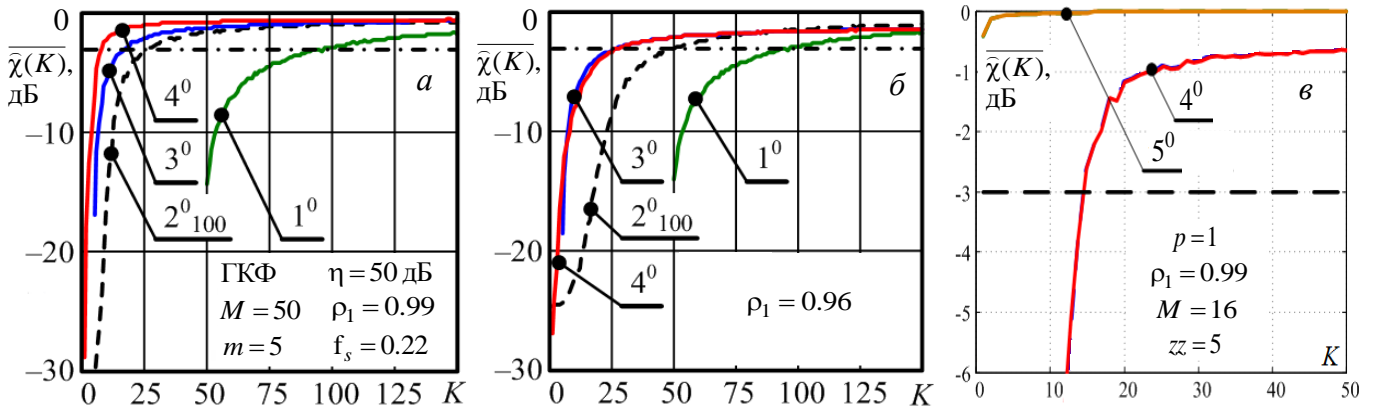


Рисунок 10 – "Енергетична" швидкість оцінок 1⁰ – 4⁰ (а, б) і 4⁰ – 5⁰ (в)

При цьому було обґрунтовано, що величину параметра діагональної регуляризації β_0 доцільно вибирати залежно від розмірності задачі (як і в умовах шумових завад) і від виду кореляційної функції пасивних завад, а кількість ступенів АРФ слід обмежувати величиною $zz = 4 \div 6$ (стрічкова регуляризація).

У ході досліджень проведено синтез структури (рис. 11) й алгоритмів роботи цифрової адаптивної системи захисту РЛС від пасивних завад на основі послідовного АРФ, що забезпечує високу швидкість завадозахисту в умовах навчаючої вибірки малого об'єму за рахунок використання стрічково-діагонально регуляризованої матричної імпульсної характеристики (МІХ) і настроювання за одним з двох алгоритмів залежно від того, постійний або вобульований міжімпульсний інтервал зондування використовується в РЛС.

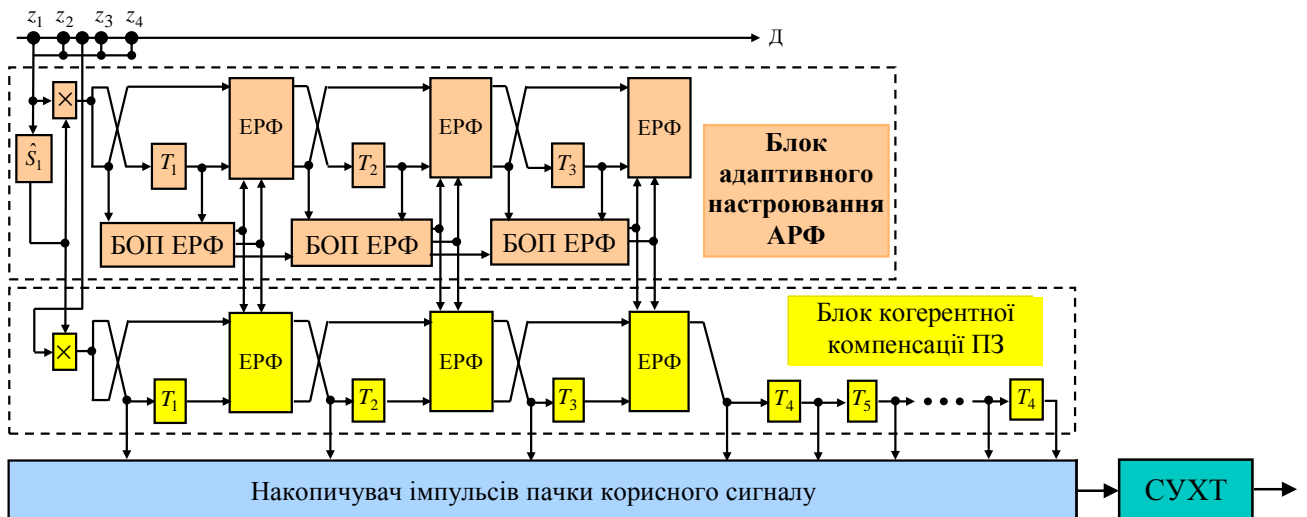


Рисунок 11 – Схема системи захисту РЛС від ПЗ на основі послідовного АРФ

В умовах постійного інтервалу зондування, рекомендується використовувати тьоплицевий алгоритм його настроювання АРФ (крива 5⁰ на рис. 10, в) [7], який суттєво виграє за швидкодією порівняно з базовим алгоритмом загального вигляду (крива 4⁰ на рис. 10, в), а в умовах міжімпульсної вобуляції інтервалів зондування – рекурентний комбінований алгоритм його настроювання [7, 8, 59].

В обох випадках *класифікованість* навчаючої вибірки пасивних завод забезпечується за рахунок використання "ковзного" за дальністю вікна вхідних даних, де елемент дальності, що перевіряється на наявність сигналу, і можливо ті, що примикають до нього, виключається з її формування [22].

Проведено багаточисельні *експериментальні дослідження* розробленої адаптивної системи заводозахисту методом напівнатурного експерименту за цифровими записами реальних пасивних завод та порівняння її ефективності з ефективністю штатних неадаптивних систем діючих РЛС (рис. 12) [23, 24, 46].

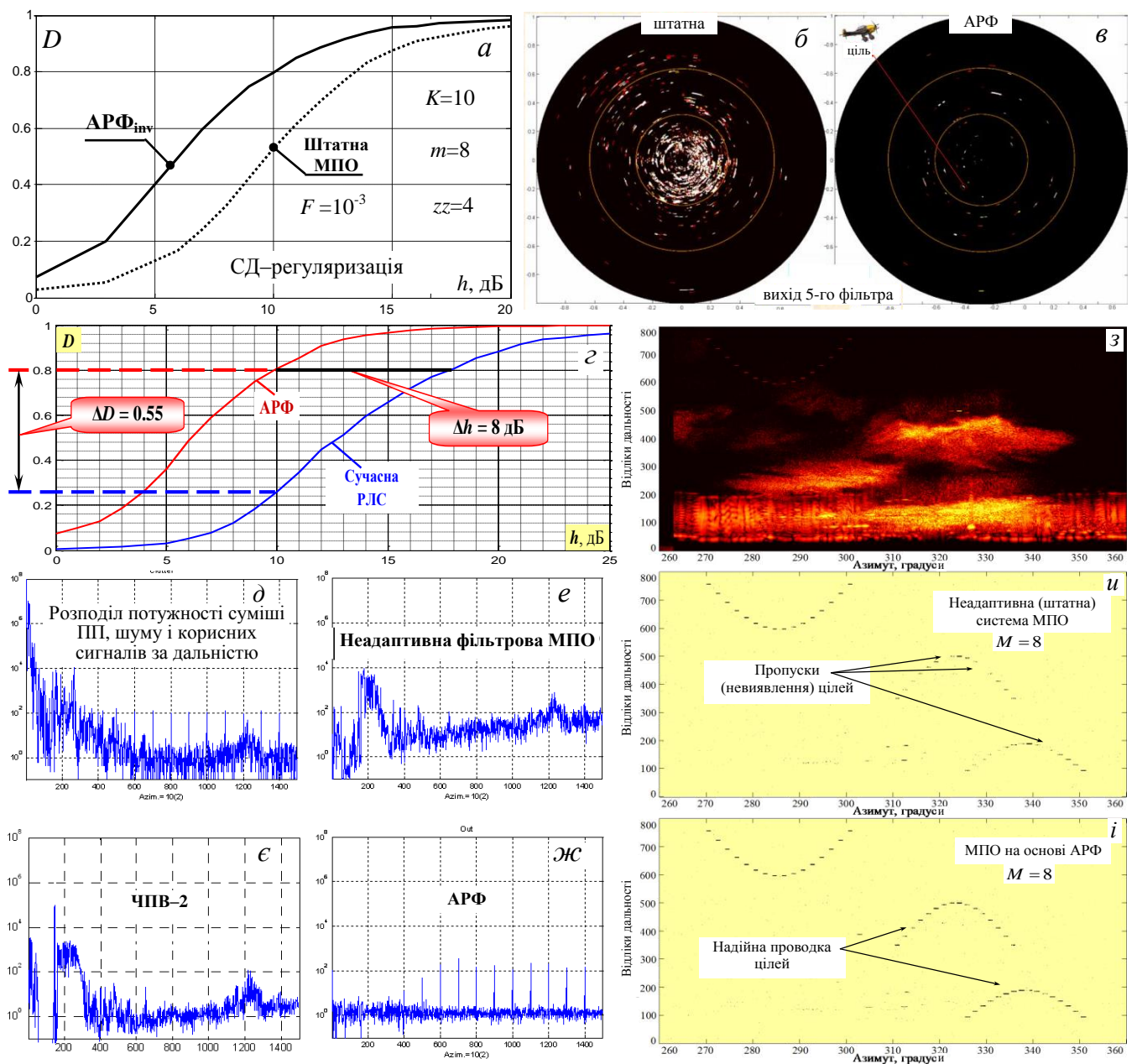


Рисунок 12 – Результати експериментальних досліджень

Вони показали, що розроблена адаптивна система на основі АРФ забезпечує *суттєві вигоди* в ефективності завадозахисту (рис. 12, *а–ж*) і надійну "безпровальну проводку" цілей в зоні інтенсивних пасивних завад, тоді як на виході штатної неадаптивної системи спостерігаються пропуски цілей (рис. 12, *з–і*).

З використанням розробленої структури (рис. 11) й рекурентного комбінованого алгоритму настроювання [7, 8, 59] було створено *дослідний зразок* цифрової системи захисту РЛС від пасивних завад на основі 5-ступеневого послідовного АРФ на базі цифрового сигнального процесора (рис. 13) [25]. Результати випробувань дослідного зразка ілюструються видом екрана ІКО (рис. 14) до (*а*) і після (*б*) компенсації пасивних завад. Видно, що при виключеній системі захисту (*а*) пасивні завади маскують корисні сигнали, тоді як після її включення (*б*) відмітки повітряних цілей впевнено виявляються.

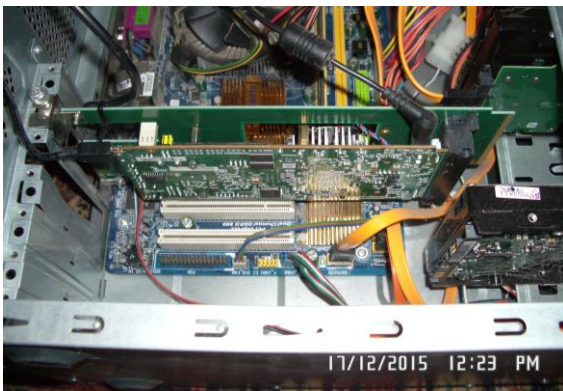
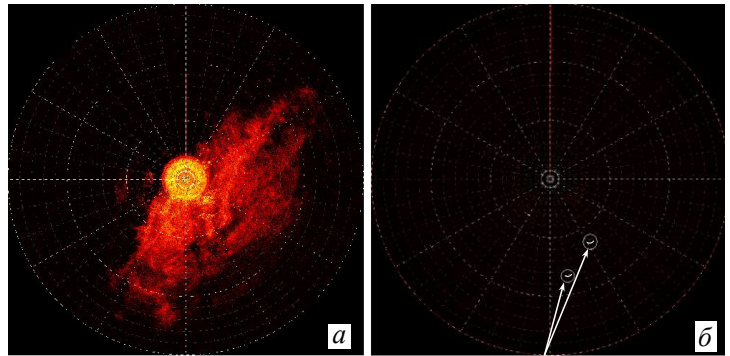


Рисунок 13 – Дослідний зразок



Виявлені цілі

Рисунок 14 – Екран ІКО до (*а*) і після компенсації (*б*)

Результати проведених теоретико-експериментальних досліджень і випробувань створеного дослідного зразка дозволяють рекомендувати розроблену адаптивну систему захисту РЛС від пасивних завад на основі послідовного АРФ для впровадження у вітчизняні РЛС.

П'ятий розділ присвячено порівняльній оцінці потенційної ефективності міжперіодної обробки когерентної пачки радіоімпульсів на фоні пасивних завад в імпульсно-доплерівських (ІД) і когерентно-імпульсних (КІ) РЛС [27, 72].

Введення більш дорогого і складного ІД режиму у свій час мало на меті підвищити ефективність методів СРЦ, особливо в бортових літакових РЛС на фоні потужних відбиттів від Землі. Однак вибір частоти зондування в умовах дії пасивних завад неоднозначний і дискутується дотепер. Причому рекомендації в літературі з цього питання часто суперечать один одному. Однією із причин такої обставини можна вважати відсутність достатньо повного кількісного аналізу ефектів ІД режиму і порівняльного аналізу його ефективності з ефективністю КІ режиму.

Досліджувалася типова наземна РЛС виявлення з дальністю 400 км і характеристиками, наведеними у табл. 1. ІД режим мав середні частоти зондування (ЧЗ) $F_2 - F_5$ з неоднозначними вимірюваннями дальності й швидкості цілі, а КІ режим – низьку частоту зондування $F_1 = 375$ Гц з однозначним вимірюванням дальності й неоднозначним вимірюванням швидкості.

Потенційна ефективність МПО сигналів аналізувалася за енергетичною швидкісною характеристикою (ЕШХ).

Таблиця 1. Параметри ІД і КІ режимів

Режим		ЧЗ, Гц		ІЗ, мс	Кратність неодно- значності	Кількість імпульсів	Кількість зон сліпих швидкостей
КІ	F_1	375	T_1	2,666	1	13	80
ІД	F_2	750	T_2	1,333	2	25	40
	F_3	1125	T_3	0,888	3	38	26
	F_4	1500	T_4	0,666	4	50	20
	F_5	1875	T_5	0,5333	5	63	16

Визначальною особливістю ІД режиму є можливість *накладення шарів* ПЗ із різних ділянок дальності з довжиною зони джерел ПЗ більшою, ніж довжина зони однозначності РЛС за дальністю.

На рис. 15 наведено результати досліджень за *відсутності накладень* умовах коли довжина хмари джерел пасивних завад менше довжини зони однозначності РЛС за дальністю, так що накладення шарів завади з різних ділянок дальності при всіх розглянутих частотах зондування відсутні. Вони підтвердили істотний вигравш в ефективності ІД режиму порівняно з КІ режимом за рахунок збільшеної кількості імпульсів і міжперіодної кореляції пасивних завад.

Під час *накладень шарів* ПЗ із різними параметрами із різних ділянок дальності зона "оптимальних" швидкостей звужується, а зона "сліпих" – розширюється (рис. 16). У зменшеній зоні оптимальних швидкостей ІД режим забезпечує потенційно більш високу ефективність порівняно з КІ режимом. У розширеній зоні сліпих швидкостей ІД режим може бути як більш та і менш ефективним.

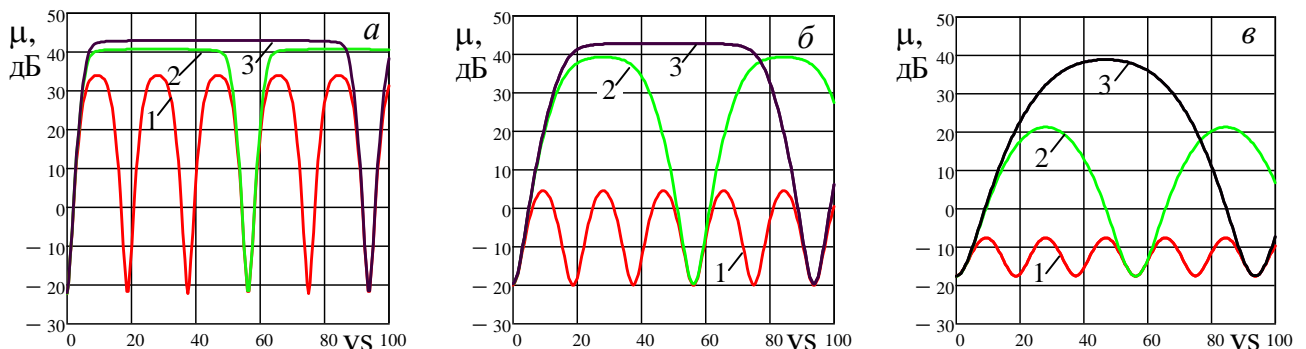


Рисунок 15 – ЕШХ за відсутності перекриття ПЗ (ширина спектра швидкостей $\Delta v_c = 1$ м/с (а), 3 м/с (б), 6 м/с (в); F_1 – крива 1, F_3 – крива 2, F_5 – крива 3)

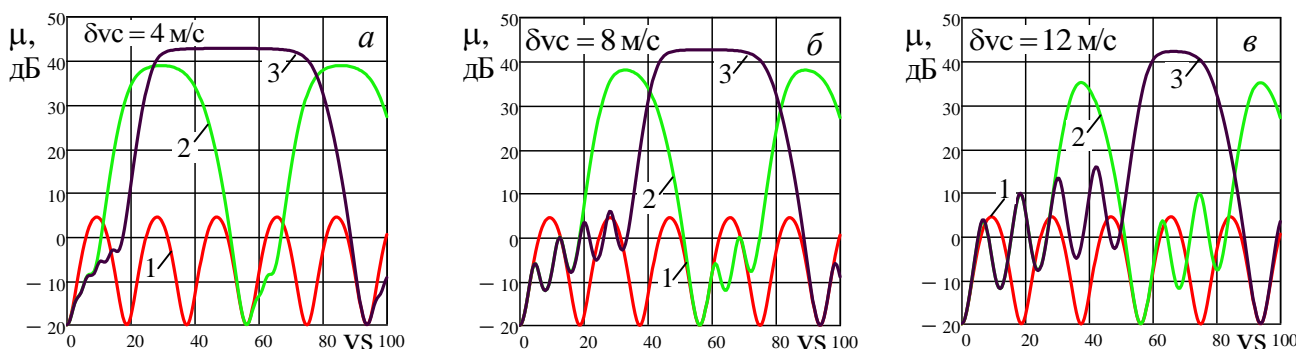


Рисунок 16 – ЕШХ в умовах перекриття ПЗ

Тим самим задача розширити швидкісну зону безпровальної проводки цілей (зону оптимальних швидкостей) в умовах накладення шарів ПЗ із різними параметрами, що стоїть перед ІД режимом, може бути нездійсненна.

Рішення про вибір частоти зондування має ухвалюватися залежно від призначення РЛС, характеру цілей, що обслуговуються, необхідних тактико-технічних характеристик, особливостей роботи з урахуванням отриманих у розділі результатів порівняльного кількісного аналізу ефективності міжперіодної обробки когерентної пачки радіоімпульсів на фоні пасивних завад в імпульсно-доплерівських і когерентно-імпульсних РЛС.

Шостий розділ присвячено теоретико-експериментальній оцінці граничних можливостей систем сумісної, роздільної (послідовної) і комбінованої (на основі послідовних) просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих (адитивної суміші шумових і пасивних) завад [29].

Роботи практичної спрямованості, присвячені захисту РЛС від комбінованих завад, часто побудовані за подібною схемою – спочатку коротко згадується

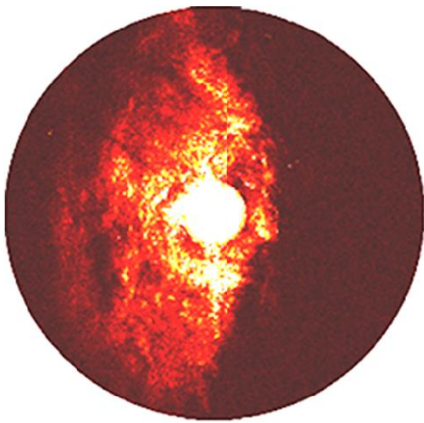


Рисунок 17 –Вигляд екрана ІКО в ході дії пасивних завад

оптимальна сумісна просторово-часова обробка сигналів на їхньому фоні, яка майже відразу оголошується занадто складною для практичної реалізації, після чого автори переходять до неоптимальної роздільної обробки, яка допускає, на їхню думку, більш просту реалізацію. При цьому зазвичай виявляється, що відмова від оптимальної обробки і її адаптивних варіантів, як правило, не проходить "безболісно", а супроводжується

втратами різного роду. Так, для адаптивного настроювання роздільних систем потрібні класифіковані вибірки шумових (ШЗ) і пасивних (ПЗ) завад, відсутність яких може знижувати

ефективність обробки в цілому. Але сформувати такі вибірки в умовах комбінованих завад досить складно, а часом – і неможливо. Наприклад, надія

набрати класифіковану вибірку ШЗ на ділянках дальності, де відсутні ПЗ, може не виправдатися у завадовій обстановці, що показано на рис. 17, в північному й південному напрямках, у

яких ПЗ присутня практично на всій дистанції. Ще більш складно сформувати класифіковану вибірку ПЗ в умовах постійно діючих ШЗ. Тому

необхідно було оцінити величину вказаних втрат.

Для цього було розроблено моделі вхідних дій і отримані розрахункові співвідношення, за якими було побудовано кут-швидкісні характеристики (КШХ) (рис. 18) оптимальної сумісної просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС), які визначають верхні межі ефективності [29].

Роботи практичної спрямованості, присвячені захисту РЛС від комбінованих завад, часто побудовані за подібною схемою – спочатку коротко згадується

оптимальна сумісна просторово-часова обробка сигналів на їхньому фоні, яка майже відразу оголошується занадто складною для практичної реалізації, після чого автори переходять до неоптимальної роздільної обробки, яка допускає, на їхню думку, більш просту реалізацію. При цьому зазвичай виявляється, що відмова від оптимальної обробки і її адаптивних варіантів, як правило, не проходить "безболісно", а супроводжується втратами різного роду. Так, для адаптивного настроювання роздільних систем потрібні класифіковані вибірки шумових (ШЗ) і пасивних (ПЗ) завад, відсутність яких може знижувати ефективність обробки в цілому. Але сформувати такі вибірки в умовах комбінованих завад досить складно, а часом – і неможливо. Наприклад, надія набрати класифіковану вибірку ШЗ на ділянках дальності, де відсутні ПЗ, може не виправдатися у завадовій обстановці, що показано на рис. 17, в північному й південному напрямках, у яких ПЗ присутня практично на всій дистанції. Ще більш складно сформувати класифіковану вибірку ПЗ в умовах постійно діючих ШЗ. Тому необхідно було оцінити величину вказаних втрат.

Для цього було розроблено моделі вхідних дій і отримані розрахункові співвідношення, за якими було побудовано кут-швидкісні характеристики (КШХ) (рис. 18) оптимальної сумісної просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС), які визначають верхні межі ефективності [29].

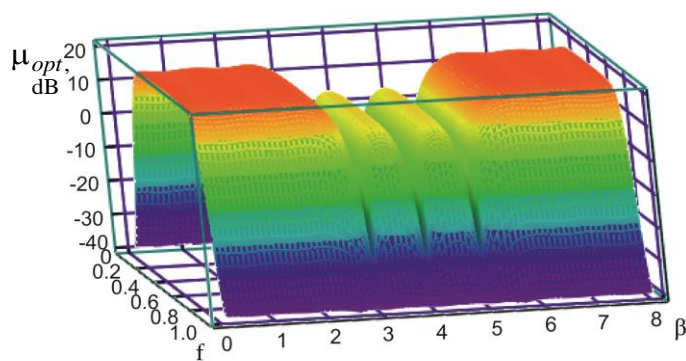


Рисунок 18 – КШХ оптимальної ПЧОС

Втрати ефективності неоптимальної роздільної (послідовної) обробки сигналів залежать від рівня "чужої" завади в першому ступені обробки. Так, ефективність послідовної роздільної просторо-часової обробки сигналів знижується за рахунок "участі" пасивних завад у ході формування вагового вектора просторової обробки. При $\sigma_{cl}^2 = 50$ дБ втрати досягають до 30 дБ (рис. 19).

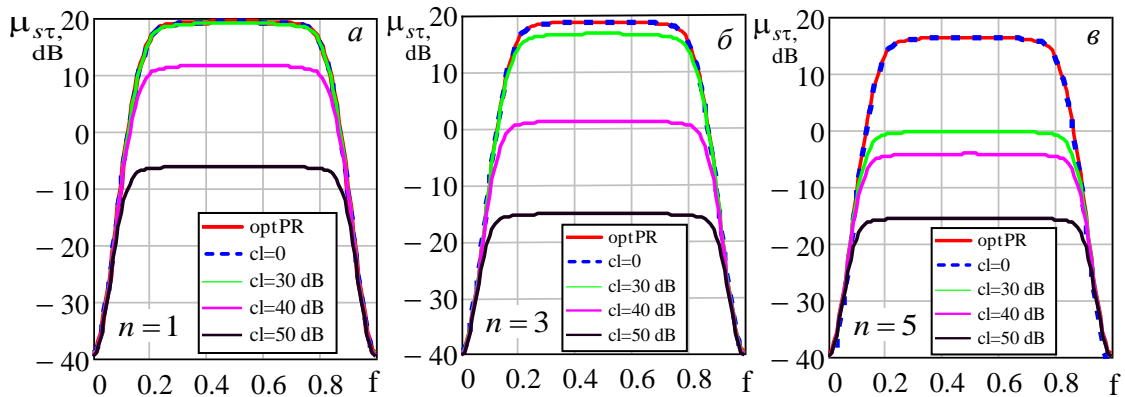


Рисунок 19 – Перетини КШХ площиною $\beta = 6,5$

У запропонованій схемі комбінованої обробки (рис. 20) використовуються послідовні системи просторово-часової (ПЧ) і часово-просторової обробки (ЧП) сигналів у рамках єдиної ітераційної процедури, на кожному кроці якої кожна з них підвищує ефективність іншої системи й, тим самим, обробки в цілому без усунення "чужих" завад. Вона може бути використана для практичної реалізації у РЛС програмного огляду, для яких не вимагається робота у реальному часі.

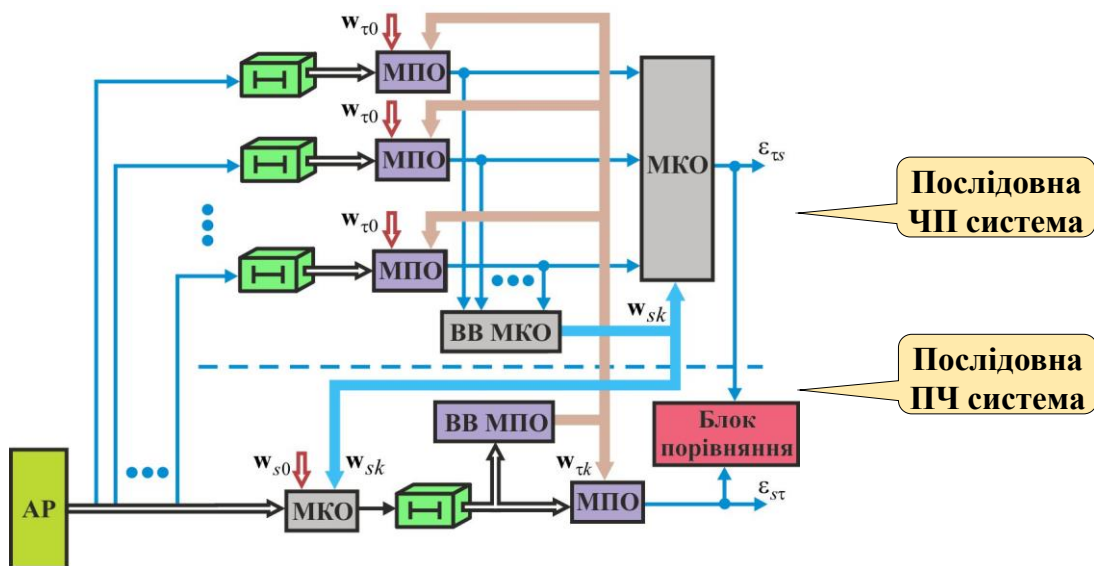


Рисунок 20 – Комбінована просторово-часова обробка сигналів

Сьомий розділ присвячено теоретико-експериментальній оцінці ефективності адаптивної системи послідовної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад і розробленню нової адаптивної системи захисту РЛС з ФАР від комбінованих завад на основі АРФ із використанням сумісної просторово-часової обробки сигналів [6, 7, 28, 40, 47, 54, 71].

За отриманим співвідношенням вихідного відношення сигнал/(завада + шум)

$$\mu(K) = h_{sign} \cdot \frac{|\widehat{\mathbf{w}}_{\tau}^*(K) \cdot \mathbf{x}_{\tau} \bullet \widehat{\boldsymbol{\omega}}|^2}{\widehat{\mathbf{w}}_{\tau}^*(K) \cdot \left(\text{diag} \left[\widehat{\mathbf{w}}_m^* \cdot \boldsymbol{\Phi}_a \cdot \widehat{\mathbf{w}}_m \right]_{m=1}^M + \widehat{\boldsymbol{\Omega}} \bullet \boldsymbol{\Phi}_c \right) \cdot \widehat{\mathbf{w}}_{\tau}(K)}, \quad (7)$$

$$\widehat{\boldsymbol{\omega}} = \left[\widehat{\mathbf{w}}_m^* \cdot \mathbf{x}_s \right]_{m=1}^M, \quad \widehat{\mathbf{w}}_m^* = \mathbf{w}_m^{(s)*} = \left[\widehat{w}_n^{(s)*} \right]_{n=1}^N, \quad m \in 1, M, \quad \widehat{\boldsymbol{\Omega}} = \left[\widehat{w}_i^* \cdot \widehat{w}_j \right]_{i,j=1}^M, \quad \widehat{\mathbf{w}}_{\tau} = \boldsymbol{\Psi}_b \text{rest} \cdot \mathbf{x}_{\tau}.$$

було оцінено вплив флуктуацій оцінки просторового вагового вектору (ПВВ) послідовної просторово-часової обробки від періоду до періоду зондування і "некласифікованості" навчаючої вибірки на якість заглушення завад. Тут K – об'єм навчаючої вибірки; $\widehat{\boldsymbol{\omega}}$ – M – вимірний вектор, що спотворює M – вимірний вектор часового сигналу \mathbf{x}_{τ} ; $\widehat{\boldsymbol{\Omega}}$ – $M \times M$ матриця "декореляцій", внесених у КМ пасивних завад $\boldsymbol{\Phi}_c$ відмінністю оцінних ПВВ $\widehat{\mathbf{w}}_m^{(s)} = \boldsymbol{\Psi}_a \mathbf{a}_m \cdot \mathbf{x}_s$ ($m \in 1, M$) у різних інтервалах зондування; h_{sign} – відносна дисперсія випадкового амплітудного множника; $\boldsymbol{\Psi}_b \text{rest}$ – ермітова стрічкова матриця, обернена до кореляційної матриці адитивної суміші пасивних завад, внутрішнього шуму і залишків компенсації шумових завад після просторової обробки сигналів; $\widehat{\mathbf{w}}_{\tau}$ – оцінка часового вагового вектора на етапі МПО сигналів; \bullet – символ покомпонентного множення (добуток Шура – Адамара).

Результати аналізу показали, що флуктуації оцінки ПВВ від періоду до періоду зондування, обумовлені скінченністю навчаючої класифікованої вибірки, призводять до декореляції пасивних завад, і, відповідно, до енергетичних втрат на етапі МПО сигналів. Наприклад, в ході дії одного постановника шумових завад із відносною потужністю 50 дБ ці втрати становлять ≈ 20 дБ (рис. 21, а).

Якщо при цьому навчаюча вибірка шумових завад є некласифікованою, то втрати збільшуються до 23 дБ з відносною вхідною потужністю пасивних завад 50 дБ, 30 дБ із яких потрапили в навчаючу вибірку (рис. 21, а).

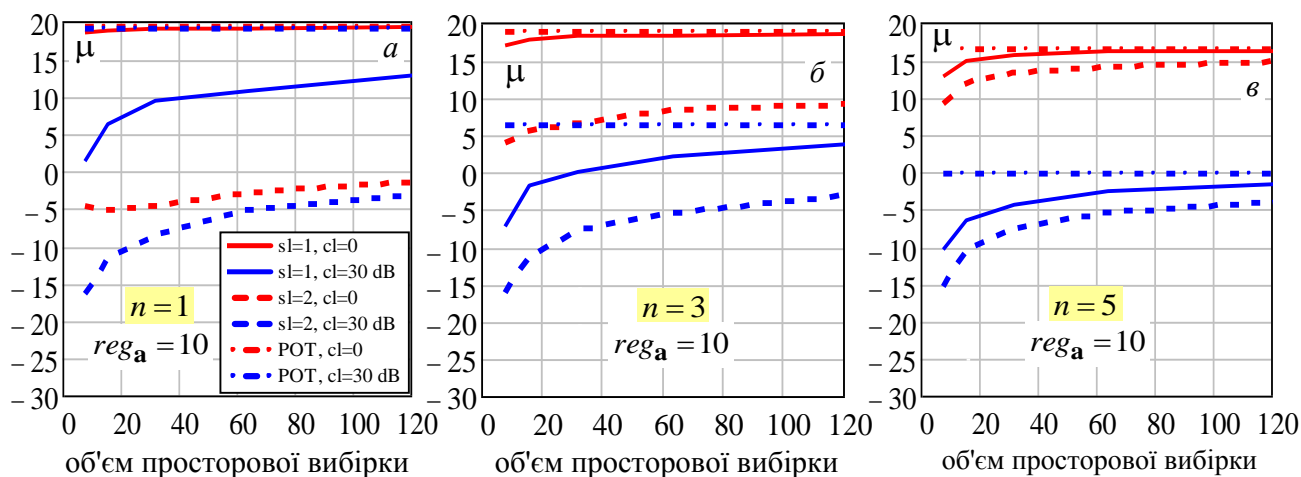


Рисунок 21 – Залежності $\mu(K)$ (7)

Ці обставини змушують дослідників шукати можливості формування класифікованої навчаючої вибірки ШЗ, а розробників, навіть в умовах такої вибірки, фіксувати ПВВ на час міжперіодної компенсації ПЗ. Однак така фіксація під час обертання антени РЛС кругового огляду за азимутом або руху постановників ШЗ може знижувати ефективність просторової обробки сигналів через "старіння" ПВВ.

Методами математичного (рис. 22) й гідроакустичного (рис. 23) моделювання оцінено *припустимий інтервал фіксації* ПВВ [28], який визначався величиною кутового переміщення постановників ШЗ (ПШЗ) або кутового повороту ДС антени, відлічуваної від моменту початку до закінчення використання зафіксованого вагового вектора, за якого ефективність (ВСЗШ або коефіцієнт заглушення) адаптивної компенсації ШЗ знижувалася не більше, ніж на 3 дБ.

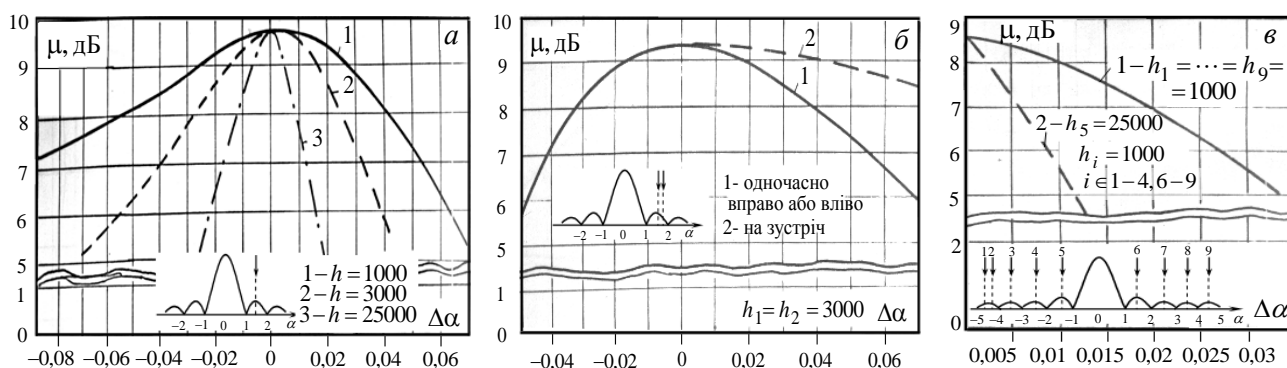


Рисунок 22 – Залежності ВСЗШ від кутового переміщення ПШЗ

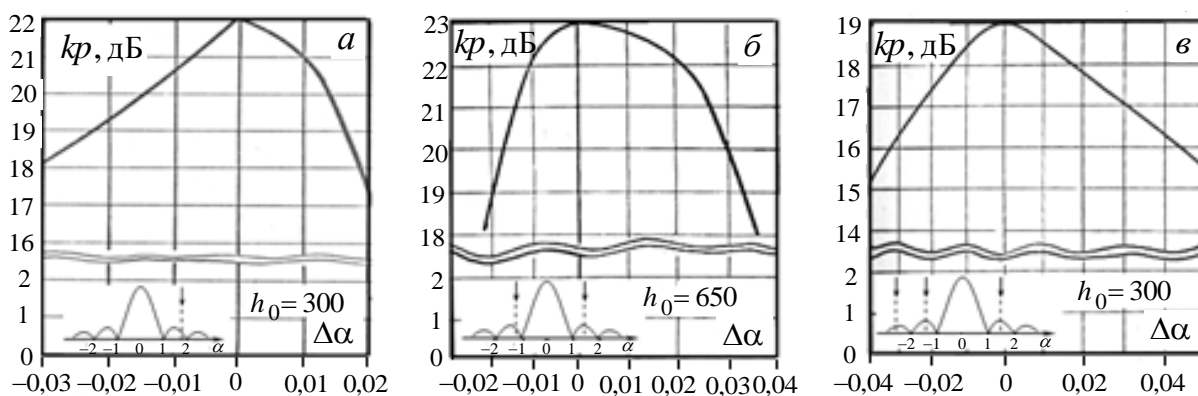


Рисунок 23 – Залежності коефіцієнта заглушення від кутового переміщення ПШЗ

Аналіз результатів досліджень показав, що при втратах у ВСЗШ, рівних 3 дБ, фіксація вагового вектора при різній завадовій обстановці має здійснюватися на час, при якому ДС антени РЛС кругового огляду повертається на величину, яка не перевищує величину від 0,01 до 0,1 часток ширини ДС антени, що часто на практиці не може бути виконано.

В РЛС програмного огляду з ФАР за інтервал фіксації вагового вектора постановники ШЗ не мають переміститися за кутовою координатою на цю величину і інтервал фіксації вагового вектора має бути не більшим, ніж 6 мс – 210 мс, що може бути виконано на практиці.

Крім того, коли в адаптивній послідовній системі просторова обробка сигналів передус міжперіодній, то в РЛС програмного огляду збільшуються можливості отримати класифіковану навчаючу вибірку шумових завад, наприклад, на початку такту роботи після електронного перемикання променя ФАР в заданий кутовий напрямок без випромінювання зондувального сигналу.

Тому для РЛС програмного огляду з ФАР було розроблено дослідний зразок цифрової системи послідовного захисту РЛС від комбінованих завад на основі АРФ (рис. 24) [71]. Результати випробувань дослідного зразка ілюструються видом екрана ІКО (рис. 25) до (а) і після (б) компенсації комбінованих завад. Видно, що

при виключеній системі захисту (а) комбіновані завади маскують корисні сигнали, тоді як після її включення (б) відмітки повітряних цілей впевнено виявляються.

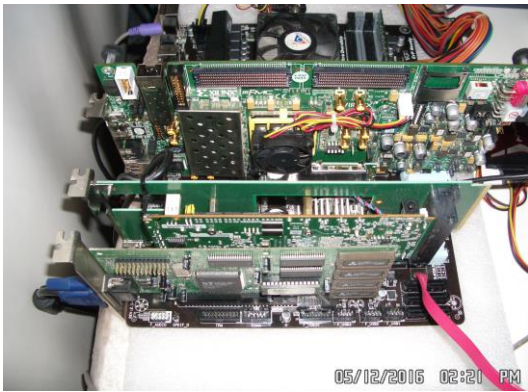


Рисунок 24 – Дослідний зразок

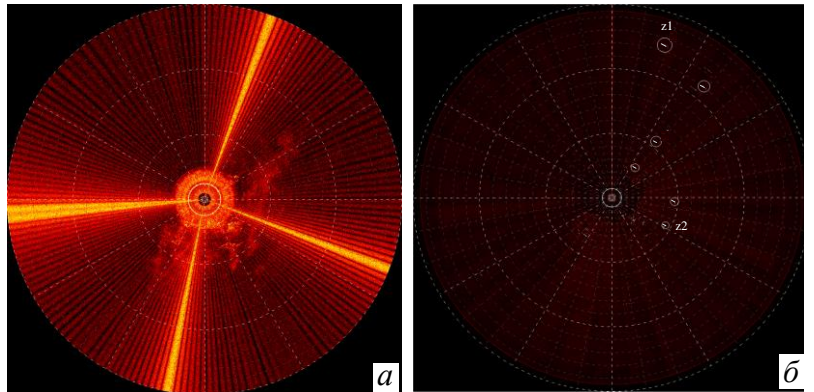


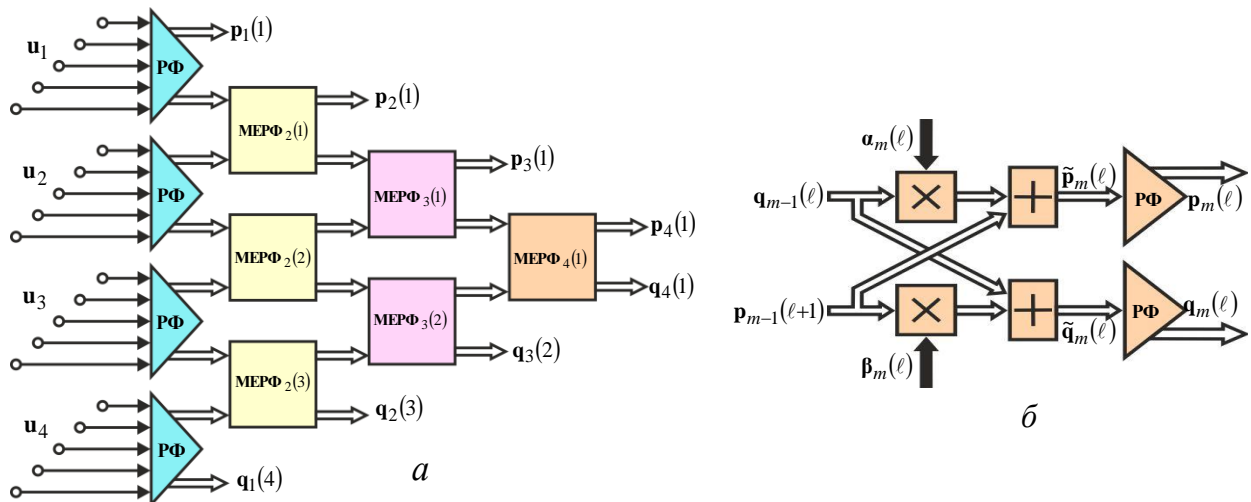
Рисунок 25 – Екран ІКО до (а) і після компенсації (б)

Для підвищення ефективності адаптивної обробки сигналів на фоні адитивної суміші шумових і пасивних завад необхідно *усунути причини*, що породжують істотне зниження ефективності послідовної просторової й часової обробки сигналів:

- некласифікованість навчаючої вибірки в ході оцінювання вагових векторів;
- необхідність запам'ятовування ПВВ на час міжперіодної компенсації ПЗ.

Для усунення цих істотних недоліків роздільної просторово-часової обробки сигналів запропоновано перейти до адаптивної сумісної просторово-часової обробки. У такій системі вхідна вибірка суміші шумових і пасивних завад є й навчаючою, тому відпадає необхідність пошуку класифікованих вибірок шумових і пасивних завад і запам'ятовування оцінки вагового вектора просторової обробки.

З цією метою було синтезовано *двовимірні* АРФ [6], основою яких є матричний елементарний решітчастий фільтр (МЕРФ) (рис. 26).

Рисунок 26 – Двовимірний РФ (а) і ℓ -й МЕРФ його m -го ступеня (б)

На основі двовимірних АРФ було синтезовано нові структури й алгоритми роботи *адаптивних* систем *сумісної* просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад для РЛС програмного і кругового огляду, зокрема, паралельної системи сумісної обробки і більш простішої *паралельно-послідовної* системи сумісної обробки сигналів (рис. 27). Суттєво, що у цій системі кількість операцій

комплексного множення $(M_{\text{МЕРФ}} \cdot N)^2$ під час непрямого обертання КМ суттєво менша, ніж $(M \cdot N)^3$ під час прямого обертання КМ, що спрощує її реалізацію.

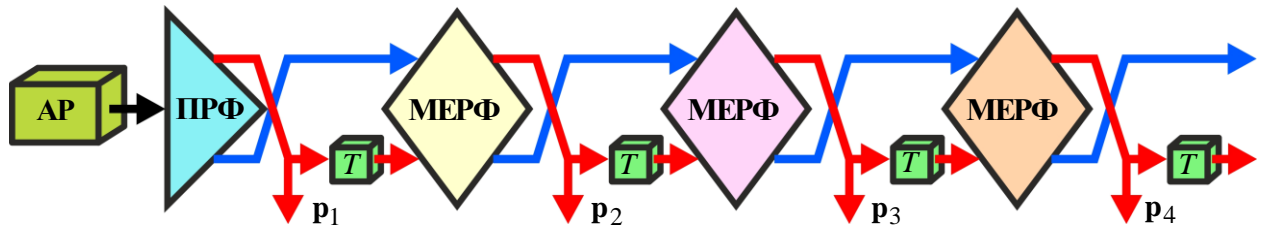


Рисунок 27 – Паралельно-послідовна сумісна просторово-часова обробка сигналів

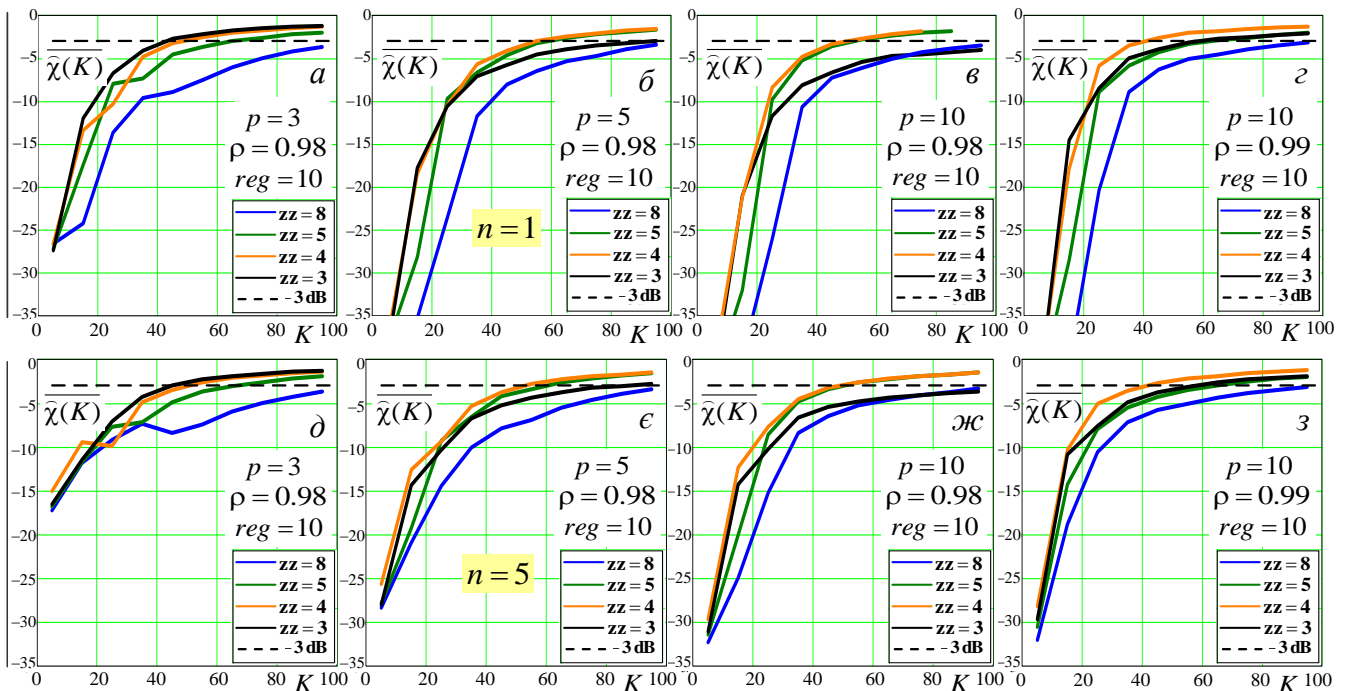


Рисунок 28 – Залежності втрат у ВСЗШ (у дБ) від об'єму вибірки комбінованих завад

Результати досліджень (рис. 28), показали, що

- залежності середнього значення втрат ВСЗШ від об'єму навчаючої вибірки на виході паралельно-послідовної сумісної системи ПЧОС на фоні комбінованих завад порівняно з його максимальним значенням наближаються до потенціалу;

- "оптимальну" кількість МЕРФ слід вибирати рівною $zz = 3 - 5$ (стрічкова регуляризація) і вона слабо залежить від завадової обстановки.

- збільшення кількості просторових каналів у L раз збільшує в L раз розмірність задачі, тобто кількість оцінюваних параметрів, а, отже, збільшує в L раз час збіжності системи (зменшує в L раз швидкодія). Це означає, що необхідний об'єм навчаючої вибірки пропорційний кількості просторових каналів, що обмежує кількість компенсаційних просторових каналів (наприклад, компенсаційних модулів плоскої ФАР), а, отже, і кількість ШЗ, від яких може ефективно захищатися РЛС.

Останнє визначає напрям подальших досліджень за пошуком шляхів збільшення швидкодії адаптивної сумісної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад з великою кількістю просторових каналів.

ВИСНОВКИ

1. Розв'язано актуальну науково-прикладну проблему високоефективного й швидкодіючого адаптивного захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад на основі адаптивних решітчастих фільтрів, що забезпечує практичну реалізованість розроблених алгоритмів і структур в РЛС різного призначення та діапазонів хвиль на сучасній цифровій елементній базі.

2. Розвинуто теорію адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ): синтезовано нові структури АРФ і визначено їх характеристики і параметри для використання в адаптивних системах захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад; синтезовано нові алгоритми настроювання АРФ, що забезпечують високу ефективність і швидкодію адаптивних систем завадозахисту та розширено можливості АРФ як єдиної структурно-алгоритмічної основи адаптивних систем захисту РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад підвищеної ефективності для їхньої практичної реалізації у вітчизняні перспективні РЛС та РЛС, що модернізуються.

3. Синтезовано структуру та алгоритм роботи цифрової адаптивної системи одночасного захисту декількох основних інформаційних каналів РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових завад, що створюються декількома постановниками завад, з використанням єдиного паралельного АРФ з підвищеною ефективністю і чисельною стійкістю порівняно з відомими адаптивними системами, у тому числі, реалізованими у вітчизняних РЛС. Створено дослідний зразок такої адаптивної системи на базі сучасної цифрової програмованої логічної інтегральної схеми, випробування якого підтвердили високу його ефективність. Обґрунтовано практичні рекомендації з вибору кількості, структури та місцезрештування модулів плоскої ФАР спільної системи компенсаційних каналів з ідентичними та неідентичними характеристиками, виконання яких дозволить забезпечити ефективність захисту сукупності основних каналів РЛС від шумових завад, близькою до потенційної.

4. Досліджено особливості вимірювання кутових енергетичних параметрів прийнятих сигналів від нешумливої цілі, яка маскується зовнішніми шумовими завадами та розроблено новий метод контрольного сигналу для вимірювання кутових енергетичних параметрів сигналів, який забезпечує суттєве зменшення систематичних похибок і порівняно низький рівень флуктуаційних похибок.

5. Синтезовано структуру та алгоритм роботи цифрової адаптивної системи захисту РЛС від маскувальних пасивних завад на основі послідовного АРФ, що забезпечує високу швидкодію завадозахисту в умовах навчаючої вибірки малого об'єму і підвищену ефективність порівняно з неадаптивними системами селекції рухомих цілей, реалізованими у вітчизняних РЛС. Створено дослідний зразок такої адаптивної системи на базі сучасного цифрового сигнального процесору, випробування якого підтвердили високу його ефективність.

6. Проведено порівняльну оцінку ефективності міжперіодної обробки когерентної пачки радіоімпульсів на фоні пасивних завад в імпульсно-доплерівських і когерентно-імпульсних РЛС та на основі результатів оцінки надано практичні рекомендації розробникам РЛС контролю повітряного простору та

управління повітряним рухом з вибору частоти зондування в умовах дії пасивних завад, виконання яких дозволить забезпечити високу ефективність завадозахисту.

7. Проведено теоретико-експериментальну оцінку граничних можливостей систем сумісної, роздільної (послідовної) і комбінованої (на основі послідовних) просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад та реальних можливостей адаптивних роздільних систем у РЛС програмного й кругового огляду, та визначено величину потенційних втрат неоптимальної роздільної обробки порівняно з оптимальною сумісною обробкою сигналів і реальних втрат адаптивних роздільних систем в умовах флуктуацій оцінки просторового вагового вектора послідовної обробки, некласифікованості навчаючої вибірки шумових і пасивних завад, а також під час фіксації просторового вагового вектора в ході компенсації шумових завад на час міжперіодної компенсації пасивних завад для виключення її небажаної міжперіодної декореляції. Створено і випробувано дослідний зразок цифрової адаптивної системи послідовної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі АРФ для РЛС програмного огляду.

8. Розроблено і досліджено цифрову адаптивну систему сумісної просторово-часової обробки сигналів на фоні комбінованих завад на основі синтезованого двовимірної АРФ для РЛС програмного і кругового огляду, що забезпечує близьку до потенційної ефективність завадозахисту, та істотне зменшення кількості операцій комплексного множення для спрощення технічної її реалізації та усунення суттєвих недоліків роздільних адаптивних систем за рахунок використання тієї обставини, що вхідна вибірка комбінованих завад є й навчаючою, і відпадає необхідність пошуку класифікованих вибірок шумових і пасивних завад та фіксації оцінки вагового вектора просторової обробки сигналів.

9. Результати проведених багаточисельних математичних і напівнатурних (за цифровими записами реальних завад) експериментів та випробувань створених дослідних зразків дозволять рекомендувати впровадження розроблених цифрових адаптивних систем захисту РЛС від шумових, пасивних і комбінованих завад на основі АРФ у перспективні вітчизняні РЛС та РЛС, що модернізуються (ця рекомендація вже реалізована на трьох вітчизняних підприємствах державного концерну "Укроборонпром", на що є відповідні акти впровадження).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. История отечественной радиолокации : монографія / В. П. Рябуха и др.; под ред. А. С. Якунина. Москва: Издательский дом "Столичная энциклопедия", 2011. 767 с.
2. Рябуха В. П., Цисарж В. В., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. Модель гауссовых шумовых помех с неравномерным частотным спектром и оценка эффективности помехозащиты // Прикладная радиоэлектроника. 2018. Т. 17, № 1, 2. С. 3–13.
3. Рябуха В. П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 3. Математическая модель системы пространственной обработки сигналов в РЛС с

двумерной плоской ФАР // Прикладная радиоэлектроника. 2016. Т. 15, № 4. С. 203–217.

4. Рябуха В. П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 1. Корреляционные автокомпенсаторы на основе стохастических градиентных алгоритмов адаптации // Прикладная радиоэлектроника. 2016. Т. 15, № 1. С. 11–25.

5. Рябуха В. П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 2. Квазиньютоновские корреляционные автокомпенсаторы. Адаптивные решетчатые фильтры // Прикладная радиоэлектроника. 2016. Т. 15, № 2. С. 88–99.

6. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Рябуха В. П., Атаманский Д. В. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть I. Теория решетчатых структур // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 381–406.

7. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Рябуха В. П., Атаманский Д. В. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть II. Алгоритмы настройки АРФ // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 407–421.

8. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Рачков Д. С., Семеняка А. В. Рекуррентные алгоритмы настройки адаптивных решетчатых фильтров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2016. № 2–3. С. 26–32.

9. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А., Гриценко В. Н. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 5. Опытный образец системы помехозащиты // Прикладная радиоэлектроника. 2017. Т. 16, № 3, 4. С. 95–102.

10. Рябуха В. П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 4. Выбор количества, структуры и месторасположения компенсационных модулей в РЛС с плоской ФАР // Прикладная радиоэлектроника. 2017. Т. 16, № 1, 2. С. 3–12.

11. Семеняка А. В., Рачков Д. С., Рябуха В. П., Атаманский Д. В. Влияние конечной разрядности фазовращателей на эффективность пространственной обработки // Прикладная радиоэлектроника. 2014. Т. 13, № 2. С. 159–163.

12. Рябуха В. П., Таршин В. А. Текущее измерение информативных параметров сигнала со случайными начальной фазой и амплитудой на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 2. С. 206–210.

13. Багдасарян С. Т., Белов А. А., Рябуха В. П., Таршин В. А. Неследящее измерение в РЛС с адаптивной антенной решеткой информативных параметров сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой на фоне помех // Антенны. 2000. № 2 (45). С. 78–83.

14. Ryabukha V. P., Semeniaka A. V., Rachkov D. S., Katiushyn Ye. A. Errors in finding of direction of a target masked by noise radiations of external sources // Radioelectronics and Communications Systems. 2016. No. 59 (6). P. 244–250. (Scopus).

15. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А. СДЦ в импульсных РЛС: 1. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный

адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 466–481.

16. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С. СДЦ в импульсных РЛС: 2. Структуры, параметры и эффективность квазиоптимальных систем междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 482–496.

17. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А. СДЦ в импульсных РЛС: с формулами и картинками. 2. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех // Прикладная радиоэлектроника. 2008. Т. 7, № 2. С. 109–123.

18. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С. СДЦ в импульсных РЛС: 3. Структуры, параметры и эффективность квазиоптимальных систем междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех // Прикладная радиоэлектроника. 2009. Т. 8, № 2. С. 109–123.

19. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Зарицкий В. И., Жуга Г. А., Рачков Д. С. Структуры и эффективность квазиоптимальных систем междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". Частина 1. 2009. С. 101–104.

20. Леховицкий Д. И., Абрамович Ю. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С., Семеняка А. В. Ленточно-диагональная регуляризация МП оценок корреляционных матриц в задачах адаптивной обработки сигналов на фоне гауссовых помех // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 422–425.

21. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С., Катюшин Е. А. СДЦ в импульсных РЛС: 4. Резервы совершенствования систем СДЦ РЛС с попачечной вобуляцией интервалов зондирования // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 503–510.

22. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С. СДЦ в импульсных РЛС: 5. Адаптивные системы СДЦ // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 511–525.

23. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С., Лаврентьев В. Н. СДЦ в импульсных РЛС: 6. Полунатурные экспериментальные исследования адаптивных систем междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех на основе адаптивных решетчатых фильтров // Прикладная радиоэлектроника. Тематический выпуск, посвященный адаптивной пространственно-временной обработке сигналов. 2011. Т. 10, № 4. С. 526–536.

24. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Лаврентьев В. Н. Экспериментальные исследования систем СДЦ на основе АРФ в импульсных РЛС с

попачечной вобулящей периодов зондирования // Прикладная радиоэлектроника. 2008. Т. 7, № 1. С. 11–24.

25. Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А., Зарицкий В. І., Головін О. О. Цифрова адаптивна система захисту радіолокаторів від маскувальних пасивних завад на основі адаптивного решітчастого фільтра // Озброєння та військова техніка. 2019. № 12. С. 32–40.

26. Рябуха В. П., Коваленко А. І., Піскунов С. М., Філоненко С. Є. Метод квазіоптимального розподілу енергетичних ресурсів багатофункціональної радіолокаційної станції // Збірник наукових праць ХВУ. 2002. № 1 (39). С. 92–95.

27. Riabukha V. P., Tsisarzh V. V., Katiushyn Ye. A., Zarytskyi V. I. Estimation of potential efficiency of interperiod processing of coherent batch radio pulses against background of clutter in pulse-Doppler radars with medium frequency of probing // *Radioelectronics and Communications Systems*. 2018. Vol. 61, No. 12. P. 529–546. (Scopus).

28. Ryabukha V. P., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Katiushyn Ye. A. Estimation of Spatial Weight Vector Fixation Interval for Sequential Space-Time Signal Processing against the Background of Combined Interferences // *Radioelectronics and Communications Systems*. 2012. Vol. 55, No. 10. P. 443–451. (Scopus).

29. Lekhovytskiy D. I., Riabukha V. P., Semeniaka A. V., Atamanskiy D. V., Katiushyn Ye. A. Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities // *Radioelectronics and Communications Systems*. 2019. Vol. 62, No. 7. P. 311–341. (Scopus).

Патенти:

30. Система захисту основних (інформаційних) каналів від шумових завад : пат. 112834 Україна. МПК G01S 7/36 (2006/01), № u 2016 07939; заявл. 18.07.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

Праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

31. Rachkov D. S., Lekhovytskiy D. I., Semeniaka A. V., Riabukha V. P., Atamanskiy D. V. *Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar* : proc. of the 15th International Radar Symposium IRS 2014, Gdansk, Poland, June 16-18, 2014. P. 215–219. (Scopus).

32. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Atamanskiy D. V., Riabukha V. P. *Quasioptimal algorithms for batch coherent signals interperiod processing against background clutter* : proc. of the 15th International Radar Symposium IRS 2014, Gdansk, Poland, June 16-18, 2014. P. 25–30. (Scopus).

33. Rachkov D. S., Lekhovytskiy D. I., Semeniaka A. V., Riabukha V. P. *Statistical analysis of ground clutter and point targets impact on accuracy of weather echoes parameters estimation* : proc. of the 16th International Radar Symposium IRS 2015, Dresden, Germany, June 24-26, 2015. P. 604–609. (Scopus).

34. D. Lekhovytskiy, V. Ryabukha, V. Zarytskyi, G. Zhuga, D. Rachkov, A. Semenyaka. *Adaptive Lattice Filters for Band-Inverse Covariance Matrix Approximations* : proc. of the 10th International Conference, Modern Problems of Radio

Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010), Lviv–Slavske, February 23-27, 2010. P. 338 (CD-ROM). (Scopus).

35. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Riabukha V. P., Atamanskiy D. V. *Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: Mean power* : proc. of the 3rd int. conf. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2011), Kiev, August 25-27, 2011. P. 228–231. (Scopus).

36. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Riabukha V. P., Atamanskiy D. V. *Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: Mean radial velocity* : proc. of the 3rd int. conf. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2011), Kiev, August 25-27, 2011. P. 232–235. (Scopus).

37. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Riabukha V. P., Atamanskiy D. V. *Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: Spectrum width* : of the 3rd int. conf. proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2011), Kiev, August 25-27, 2011. P. 236–239. (Scopus).

38. Riabukha V. P., Lekhovytskiy D. I., Semeniaka A. V., Katyushin E. A. *An Exploratory Model of the Hardware-Software Unit for Adaptive Digital Time Signal Processing Against the Background of Masking Clutters* : proc. of the IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2017), Kyiv, 29 May–02 June, 2017. P. 55–58. (Scopus).

39. Riabukha V. P., Dokhov A. I., Zarytskiy V. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Katiushin I. A., Zarytskaia V. V. *Convergence rate of a number of signal processing algorithms in adaptive arrays* : proc. of the 9th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2013), Odessa, September 16-20, 2013. P. 304–306. (Scopus).

40. Lekhovytskiy D. I., Atamanskiy D. V., Riabukha V. P., Rachkov D. S., Semeniaka A. V. *Combining target detection against the background of jamming signals and jamming signal DOA estimation* : proc. of the 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, April 21-24, 2015. P. 36–40. (Scopus).

41. Riabukha V. P., Semeniaka A. V., Rachkov D. S., Ye. A. Katiushyn *Accuracy of target direction finding under action of external noise radiations in bidimensional adaptive arrays* : proc. of the 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, April 21-24, 2015. P. 160–161. (Scopus).

42. Riabukha V. P., Lekhovytskiy D. I., Semeniaka A. V., Katyushin E. A. *Choice of Number, Structure and Placement of Compensation Modules in the Radar with Planar PAA* : proc. of the 11th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2017), Kyiv, May 24-27, 2017. P. 197–198. (Scopus).

43. Bagdasaryan S. T., Belov A. A., Riabukha V. P., Tarshin V. A. *Measurement of signal informative parameters when its amplitude and phase are random in radar system with adaptive array* : proc. of the IIIrd International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'99), Sevastopol, September 8-11, 1999. P. 266–268.

44. Багдасарян С. Т., Белов А. А., Рябуха В. П., Таршин В. А., Васильев В. А. *Анализ методов измерения направления приема сигнала на фоне коррелированных*

помех в радиолокационной системе с адаптивной АР : сб. науч. трудов 1-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2002), Часть 1, г. Харьков, 8-10 окт. 2002 г. Харьков, 2002. С. 259–262.

45. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А. *Резервы совершенствования систем СДЦ импульсных РЛС с поачечной вобуляцией интервалов зондирования* : сб. науч. трудов 3-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2008), Т. 1, г. Харьков, 22-24 окт. 2008 г. Харьков, 2008. С. 101–104.

46. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А. *Экспериментальные исследования адаптивных систем СДЦ в импульсных РЛС с поачечной вобуляцией интервалов зондирования* : сб. науч. трудов 3-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2008), Т. 1, г. Харьков, 22-24 окт. 2008 г. Харьков, 2008. С. 105–109.

47. Рябуха В. П., Рачков Д. С., Семеняка А. В. *Экспериментальная оценка интервала фиксации пространственного весового вектора при последовательной пространственно-временной обработке сигналов на фоне комбинированных помех* : сб. науч. трудов 4-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2011), Т. 1, г. Харьков, 18-21 окт. 2011 г. Харьков, 2011. С. 154–157.

48. Рябуха В. П., Зарицкий В. И., Семеняка А. В., Рачков Д. С., Катюшин Е. А. *Точность пеленгации цели при воздействии внешних шумовых излучений* : сб. науч. трудов 5-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2014), Т. 1, г. Харьков, 14-17 окт. 2014 г. Харьков, 2014. С. 49–50.

49. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Рябуха В. П., Катюшин Е. А. *Подавление помех от местных предметов в импульсных доплеровских метеолокаторах* : сб. науч. трудов 5-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2014), Т. 1, г. Харьков, 14-17 окт. 2014 г. Харьков, 2014. С. 90–96.

50. Леховицкий Д. И., Атаманский Д. В., Семеняка А. В., Рачков Д. С., Рябуха В. П. *Квазиоптимальные алгоритмы междупериодной обработки пачечных когерентных сигналов на фоне гауссовых мешающих отражений* : сб. науч. трудов 5-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2014), Т. 1, г. Харьков, 14-17 окт. 2014 г. Харьков, 2014. С. 23–25.

51. Рябуха В. П., Леховицкий Д. И., Семеняка А. В., Катюшин Е. А., Зарицкий В. И. *Дослідний зразок цифрової адаптивної системи захисту радіолокаторів від активних шумових завад* : сб. науч. трудов 5-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2017), Т. 1, г. Харьков, 14-17 окт. 2014 г. Харьков, 2014. С. 79–82.

52. Леховицкий Д. И., Атаманский Д. В., Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. *Оценка влияния отражений от местных предметов на точность измерения параметров метеообразований в импульсных ДМРЛ* : сб. науч. трудов 6-го Межд. радиоэлектрон. форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и

перспективы развития" (МРФ-2017), Т. 1, г. Харьков, 24-26 окт. 2017 г. Харьков, 2017. С. 6–12.

53. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Зарицкий В. И., Жуга Г. А., Рачков Д. С., Семеняка А. В. *Сверхразрешающий спектральный анализ отраженных сигналов в доплеровских метеолокаторах* : тез. докл. XI межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2010), г. Одесса, 24-28 мая 2010 г. Одесса, 2010. С. 197.

54. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Зарицкий В. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В. *Оценка интервала фиксации пространственного весового вектора при раздельной пространственно–временной обработке сигналов на фоне помех* : тез. докл. XII межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2011), г. Одесса, 23-27 мая 2011 г. Одесса, 2011. С. 187.

55. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Семеняка А. В., Рачков Д. С. *Повышение эффективности адаптивных обнаружителей сигналов за счет учета априорной информации* : тез. докл. XIII межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2012), г. Одесса, 4-8 июня 2012 г. Одесса, 2012. С. 159.

56. Рябуха В. П., Зарицкий В. И., Рачков Д. С., Катюшин Е. А. *Выбор числа и расположения компенсационных каналов антенной решетки для защиты РЛС от шумовых помех* : тез. докл. XIII межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2012), г. Одесса, 4-8 июня 2012 г. Одесса, 2012. С. 161.

57. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Дохов А. И., Зарицкий В. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. *Быстродействие алгоритмов адаптивной пространственно-временной обработки сигналов на фоне помех* : тез. докл. XIV межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2013), г. Одесса, 27-31 мая 2013 г. Одесса, 2013. С. 222–225.

58. Рябуха В. П., Дохов А. И., Зарицкий В. И., Семеняка А. В., Рачков Д. С., Катюшин Е. А. *Ошибки пеленгации цели, маскируемой шумовыми излучениями внешних источников* : тез. докл. XV межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2014), г. Одесса, 26-30 мая 2014 г. Одесса, 2014. С. 181–182.

59. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Рачков Д. С., Семеняка А. В., *Рекуррентные алгоритмы настройки адаптивных решетчатых фильтров* : тез. докл. XVII межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2016), г. Одесса, 23-27 мая 2016 г. Одесса, 2016. С. 75–76.

60. Рябуха В. П., Леховицкий Д. И., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. *Опытный образец аппаратно-программного блока адаптивной цифровой пространственной обработки сигналов на фоне маскирующего шума* : тез. докл. XVIII межд. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2017), г. Одесса, 22-26 мая 2017 г. Одесса, 2017. С. 112–113.

61. Леховицкий Д. И., Атаманский Д. В., Семеняка А. В., Рачков Д. С., Рябуха В. П. *Квазиоптимальные алгоритмы междупериодной обработки пачечных когерентных сигналов на фоне гауссовых мешающих отражений* : тез. доп. VII

Міжнар. наук.-практ. конф. "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", м. Запоріжжя, 17-19 вересня 2014 р. Запоріжжя, 2014. С. 47–48.

62. Рябуха В. П., Леховицкий Д. И., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. *Сравнительный анализ алгоритмов адаптивной пространственной обработки сигналов на фоне гауссовых шумовых помех* : тез. доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф. "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", м. Запоріжжя, 21-23 вересня 2016 р. Запоріжжя, 2016. С. 70–71.

63. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А. *Рекуррентный алгоритм $K=4$ -рангового обновления параметров адаптивных решетчатых фильтров и его техническая реализация на основе цифрового сигнального процессора* : тез. доп. VIII Міжнар. наук.-практ. конф. "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", м. Запоріжжя, 21-23 вересня 2016 р. Запоріжжя, 2016. С. 54–55.

64. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Рябуха В. П., Катюшин Е. А. *Створення першого українського доплерівського метеорадіолокатора* : тез. доп. Міжнар. Форуму "Kharkiv-IT", м. Харків, 28 листопада 2013 р. Харків, 2013. С. 51–52.

65. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С. *Квазиоптимальные системы междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех* : труды межд. научн. конф. "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" (ИРЭМВ-2009), г. Таганрог, 27 июня-01 июля 2009 г., Таганрог – Дивноморское, 2009. С. 467–471.

66. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С. *Адаптивные системы междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех в импульсных РЛС* : труды межд. научн. конф. "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" (ИРЭМВ-2009), г. Таганрог, 27 июня-01 июля 2009 г., Таганрог – Дивноморское, 2009. С. 472–476.

67. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Зарицкий В. И., Жуга Г. А., Рачков Д. С., Семеняка А. В. *Теория и техника адаптивной междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех* : труды XVI межд. научн.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC*2010), г. Воронеж, 13-15 апреля 2010 г. Воронеж, 2010. С. 95–106.

68. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Рябуха В. П. *Квазиоптимальные алгоритмы междупериодной обработки пачечных когерентных сигналов на фоне пассивных помех* : труды XX межд. научн.-техн. конф. "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC*2014) Т. 3, г. Воронеж, 15-17 апреля 2014 г. Воронеж, 2014. С. 1660–1671.

69. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А. *Экспериментальные исследования адаптивных систем междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех на основе адаптивных решетчатых фильтров* : труды 4-й Всероссийской конференция "Радиолокация и радиосвязь", г. Москва, 15-19 ноября 2010 г. Москва, 2010. С. 432–451. Режим доступа:

70. Леховицкий Д. И., Рябуха В. П., Жуга Г. А., Рачков Д. С., Семеняка А. В. *Ленточно-диагональная регуляризация оценок максимального правдоподобия корреляционных матриц гауссовых помех в алгоритмах адаптации* : труды 4-й Всероссийской конференция "Радиолокация и радиосвязь", г. Москва, 15-19 ноября 2010 г. Москва, 2010. С. 336–358.

71. Рябуха В. П., Леховицкий Д. И., Семеняка А. В., Катюшин Е. А., Зарицкий В. І. *Дослідний зразок цифрової адаптивної системи захисту радіолокаторів від комбінованих завад* : тез. доп. V Міжнар. наук.-практ. конф. "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки", м. Київ, 11-12 жовтня 2017 р. Київ, 2017. С. 297–298.

72. Рябуха В. П., Цисарж В. В., Семеняка А. В., Катюшин Е. А., Зарицкий В. І. *Потенційна ефективність міжперіодної обробки когерентної пачки радіоімпульсів на фоні пасивних завад в імпульсно-доплерівській РЛС з середньою частотою зондування* : тез. доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф. "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки", м. Київ, 11-12 жовтня 2018 р. Київ, 2018. С. 232–234.

73. Рябуха В. П., Семеняка А. В., Катюшин Е. А., Зарицкий В. І. *Дослідний зразок цифрової адаптивної системи захисту радіолокаторів від маскувальних пасивних завад на основі адаптивного решітчастого фільтра* : тез. доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф. "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки", м. Київ, 11-12 жовтня 2019 р. Київ, 2019. С. 391–392.

АНОТАЦІЯ

Рябуха В.П. Теорія і техніка захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад на основі адаптивних решітчастих фільтрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 "Радіотехнічні та телевізійні системи" – Державне підприємство Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем "Квант-Радіолокація", Державний концерн "Укроборонпром", Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми високоефективного й швидкодіючого адаптивного захисту РЛС з плоскими ФАР від маскувальних шумових, пасивних і комбінованих завад на основі адаптивних решітчастих фільтрів, що забезпечує практичну реалізованість розроблених алгоритмів і структур в РЛС різного призначення та діапазонів хвиль на сучасній цифровій елементній базі.

Розвинуто теорію адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ) і розширено їхні можливості як єдиної структурно-алгоритмічної основи адаптивних систем захисту

РЛС з плоскими ФАР від шумових, пасивних і комбінованих завад підвищеної ефективності для їхньої практичної реалізації у вітчизняні перспективні РЛС та РЛС, що модернізуються.

Розроблено структуру й алгоритм роботи адаптивної системи одночасного захисту декількох основних (інформаційних) каналів РЛС з ФАР від шумових завад, створених декількома джерелами, і створено відповідний дослідний зразок на основі одного 15-входового 13-ступеневого паралельного АРФ із використанням програмувальної логічної інтегральної схеми, що дозволяє забезпечити захист РЛС від дії 1–12 джерел шумових завад.

Обґрунтовано практичні рекомендації з побудови спільної системи компенсаційних каналів для захисту сукупності основних каналів РЛС з плоскими ФАР від шумових завад із ідентичними і неідентичними характеристиками приймальних каналів.

Досліджено особливості вимірювання кутових параметрів сигналів на фоні шумових завад, коли кутовий параметр сигналу набуває енергетичний характер. Для зменшення систематичної похибки вимірювання кутового параметра сигналу рекомендовано застосовувати метод контрольного сигналу.

Розроблено структуру адаптивної системи захисту РЛС різного діапазону хвиль від пасивних завад на основі АРФ із стрічково-діагонально регуляризованою матричною імпульсною характеристикою та із пачковим тьоплицевим або рекурентним комбінованим $k = 4$ –ранговим алгоритмом його настроювання залежно від того, постійний або вобульований інтервал зондування використовується в РЛС, і створено дослідний зразок такої цифрової адаптивної системи на основі п'ятиступеневого послідовного АРФ і на базі високошвидкісного восьмиядерного цифрового сигнального процесору.

На моделі типової наземної РЛС виявлення, що працює в імпульсно-доплерівському режимі із середньою частотою зондування або когерентно-імпульсному режимі з низькою частотою зондування проведено математичне моделювання й отримано порівняльні кількісні оцінки їх ефективності за різних співвідношень між часовою довжиною області джерел пасивних завад і інтервалами зондування імпульсів пачки.

Проведено порівняльну оцінку граничних можливостей систем сумісної (оптимальної), роздільної (послідовної) і комбінованої (на основі послідовних) просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС) на фоні комбінованих (суміші шумових і пасивних) завад. В умовах комбінованих завад роздільні системи ПЧОС неоптимальні, що призводить до великих втрат ефективності порівняно з оптимальною сумісною ПЧОС. Втрати залежать від рівня "чужої" завади в першому ступені обробки, а також від радіальної швидкості руху цілі й напрямку візування.

Проведено аналіз впливу флуктуацій оцінки просторового вагового вектора (ПВВ) послідовної ПЧОС і "некласифікованості" навчаючої вибірки на якість заглушення пасивних завад, а також оцінено припустимий інтервал фіксації ПВВ.

Для усунення істотних недоліків роздільної ПЧОС запропоновано перейти до адаптивної сумісної просторово-часової обробки. У такій системі вхідна вибірка суміші шумових і пасивних завад є й навчаючою, тому відпадає необхідність пошуку класифікованих вибірок шумових і пасивних завад і запам'ятовування

оцінки вагового вектора просторової обробки.

Розроблено паралельно-послідовну систему сумісної ПЧОС на основі синтезованого двовимірного АРФ, складовими якої є матричні елементарні решітчасті фільтри. Результати математичного моделювання, показали, що при відносно невеликій кількості просторових каналів ефективність розробленої паралельно-послідовної сумісної системи ПЧОС і відносно невеликому об'ємі навчаючої вибірки комбінованих завад наближається до потенціалу.

Ключові слова: адаптивний решітчастий фільтр, шумова, пасивна, комбінована завада, завадозахист, просторово-часова обробка, ваговий вектор, дослідний зразок.

АННОТАЦІЯ

Рябуха В.П. Теория и техника защиты РЛС с плоскими ФАР от маскирующих шумовых, пассивных и комбинированных помех на основе адаптивных решетчатых фильтров. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.17 "Радиотехнические и телевизионные системы" – Государственное предприятие Научно-исследовательский институт радиолокационных систем "Квант-Радиолокация", Государственный концерн "Укроборонпром", Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2020.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы высокоэффективной и быстродействующей адаптивной защиты РЛС с плоскими ФАР от маскирующих шумовых, пассивных и комбинированных помех на основе адаптивных решетчатых фильтров, которая обеспечивает практическую реализацию разработанных алгоритмов и структур в РЛС различного назначения и диапазонов волн на современной цифровой элементной базе.

Развита теория адаптивных решетчатых фильтров (АРФ) и расширены их возможности как единой структурно-алгоритмической основы адаптивных систем защиты РЛС с плоскими ФАР от шумовых, пассивных и комбинированных помех повышенной эффективности для их практической реализации в отечественных перспективных и модернизируемых РЛС.

Разработана структура и алгоритм работы адаптивной системы одновременной защиты нескольких основных (информационных) каналов РЛС с ФАР от шумовых помех, создаваемых несколькими источниками, и создано соответствующий опытный образец на основе одного 15-входового 13-ступенчатого параллельного АРФ с использованием программируемой логической интегральной схемы, которая позволяет обеспечить защиту РЛС от воздействия 1–12 источников шумовых помех.

Обоснованы практические рекомендации по построению общей системы компенсационных каналов для защиты совокупности основных каналов РЛС с плоскими ФАР от шумовых помех с идентичными и неидентичными характеристиками приемных каналов.

Исследованы особенности измерения угловых параметров сигналов на фоне шумовых помех, когда угловой параметр сигнала приобретает энергетический

характер. Для уменьшения систематической ошибки измерения углового параметра сигнал рекомендовано применять метод контрольного сигнала.

Разработана структура адаптивной системы защиты РЛС различных диапазонов волн от пассивных помех на основе АРФ с диагонально регуляризованой матричной импульсной характеристикой и с пачечным теплицевым или рекуррентным комбинированным $k=4$ -ранговым алгоритмом его настройки в зависимости от того, постоянный или вобулированный интервал зондирования используется в РЛС, и создан опытный образец такой цифровой адаптивной системы на основе пятиступенчатого последовательного АРФ и на базе высокоскоростного восьмиядерного цифрового сигнального процессора.

На модели типовой наземной РЛС обнаружения, работающей в импульсно-доплеровском режиме со средней частотой зондирования или когерентно-импульсном режиме с низкой частотой зондирования проведено математическое моделирование и получены сравнительные количественные оценки их эффективности при разных соотношениях между временной длиной области источников пассивных помех и интервалами зондирования импульсов пачки.

Проведена сравнительная оценка предельных возможностей систем совместной (оптимальной), раздельной (последовательной) и комбинированной (на основе последовательных) пространственно-временной обработки сигналов (ПЧОС) на фоне комбинированных (смеси шумовых и пассивных) помех. В условиях комбинированных помех раздельные системы ПЧОС неоптимальны, что приводит к большим потерям эффективности по сравнению с оптимальной совместной ПЧОС. Потери зависят от уровня "чужой" помехи в первой ступени обработки, а также от радиальной скорости движения цели и направления визирования.

Проведен анализ влияния флуктуаций оценки пространственного весового вектора последовательной ПЧОС и "неклассифицированности" обучающей выборки на качество подавления пассивных помех, а также оценен допустимый интервал фиксации пространственного весового вектора.

Для устранения существенных недостатков раздельной ПЧОС предложено перейти к адаптивной совместной пространственно-временной обработке. В такой системе входная выборка смеси шумовых и пассивных помех есть и обучающей, поэтому отпадает необходимость поиска классифицированных выборок шумовых и пассивных помех и запоминания оценки весового вектора пространственной обработки.

Разработана параллельно-последовательная система совместной ПЧОС на основе синтезированного двумерного АРФ, составными элементами которой являются матричные элементарные решетчатые фильтры. Результаты математического моделирования, показали, что при относительно небольшом количестве пространственных каналов эффективность разработанной параллельно-последовательной совместной системы ПЧОС и относительно небольшом объеме обучающей выборки комбинированных помех приближается к потенциалу.

Ключевые слова: адаптивный решетчатый фильтр, шумовая, пассивная, комбинированная помеха, помехозащита, пространственно-временная обработка, весовой вектор, опытный образец.

ABSTRACT

Riabukha V.P. The theory and technology of planar phased array radar protection against masking noise jamming, clutter, and combined interference, based on adaptive lattice filters. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.12.17 "Radiotechnical and television systems" – State enterprise "Scientific Research Institute of Radar Systems "Kvan-Radiolokatsia"; The State Concern "UkrOboronProm", Kharkiv National University of Radioelectronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The thesis is devoted to the solution of actual problem of high-efficient and high-performance adaptive masking noise jamming, clutter, and combined interference protection for the planar phased array radar, based on adaptive lattice filters, which, using a modern digital element base, provides practical implementation of the developed algorithms and structures in different purpose and different wave radars.

The adaptive lattice filters (ALF) theory is developed and the ALF capabilities are extended as of a single structural and algorithmic basis for systems of adaptive planar phased array radar protection of increased efficiency against noise jamming, clutter, and combined interference for their practical implementation in domestic perspective radars and radars under modernization.

There are developed a structure and operation algorithm for the adaptive system of simultaneous protection of several main (information) channels of phased array radar against noise jamming being created by several sources. The appropriate exploratory model is created, based on a single 15-input 13-stage parallel ALF using the field programmable gate array (FPGA), that provides the possibility of radar protection against the action of 1–12 noise jammers.

There are substantiated practical recommendations on building a common system of compensation channels for the planar phased array radar in order to protect the aggregate of its main channels against noise jamming at identical and non-identical characteristics of receive channels.

Peculiarities of angular parameter measurements for signals embedded in noise jamming are investigated for the case when the signal angular parameter takes on the energy character. To reduce the systematic error of measuring the angular parameter of the signal, it is recommended to use the control signal method.

A structure of the different wave radar adaptive clutter protection system is developed, based on the ALF having strip-diagonal regularized matrix pulse characteristics and either the train Toeplitz algorithm or combined $k = 4$ rank recurrent algorithm of its tuning subject to whether a constant or wobbled probe interval is employed in the radar. The exploratory model of such a digital adaptive system is created, based on the 5-stage sequential ALF and the high-performance octa-core digital signal processor.

The mathematical modeling is carried out using a model of the typical ground-based detection radar operating either at a pulse-Doppler mode with a middle sounding frequency or at the coherent-pulse mode with a low sounding frequency. For their

efficiencies, comparative numerical estimates are obtained given various ratios between the time length of the region with clutter sources and sounding intervals of train pulses.

Limiting potentialities of systems of joint (optimal), separate (sequential) and combined (based on the sequential ones) space-time processing of signals (STSP) embedded in combined interferences (a noise-jamming + clutter mix) are compared. Under conditions of combined interference, the separate STSP systems are non-optimal what leads to large efficiency losses as compared with the optimal joint STSP. The losses depend on the level of "alien" interference at the first stage of processing, and on the radial velocity of target movement and direction of boresight.

There is analyzed the influence of both the spatial weight vector (SWV) estimate fluctuations of sequential STSP and the impossibility of the sample to be classified on the quality of clutter suppression and an admissible interval of SWV fixing is estimated.

To cancel the essential shortages of the separate STSP, it is proposed to proceed to the adaptive joint space-time processing. In such a system, the input sample containing a noise-jamming&clutter mix is the training sample too; there is no need, therefore, to search for classified noise-jamming and clutter samples and to memorize the spatial weight vector estimate of space processing.

A parallel-sequential system of joint STSP is developed, based on synthesized two-dimensional parallel-sequential ALF, components of which are matrix element lattice filters. The mathematical modeling results have shown that the efficiency of the developed parallel-sequential joint STSP system given a relatively small number of spatial channels at a relatively small size of combined interference sample approaches the potential.

Key words: adaptive lattice filter, noise jamming, clutter, combined interference, space-time processing, weight vector, exploratory model.

Підписано до друку 26.08.2020 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,16.
Наклад 80 прим. Замовлення № 2608

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18
Тел.: (057) 756-53-25
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua

