

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

РАЧКОВ ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.396.96:551.501.815

**УНІФІКОВАНІ СИСТЕМИ МІЖПЕРІОДНОЇ ОБРОБКИ ТА ОЦІНЮВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ ДОПЛЕРІВСЬКИХ МЕТЕОРАДІОЛОКАТОРІВ
ІЗ ДОВІЛЬНИМИ ЗАКОНАМИ ЗОНДУВАННЯ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Леховицький Давід Ісаакович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яновський Фелікс Йосипович,
Національний авіаційний університет
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри електроніки, робототехніки
і технологій моніторингу та Інтернету речей

доктор технічних наук, доцент
Василишин Володимир Іванович,
Харківський національний університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба Міністерства оборони України,
начальник кафедри радіоелектронних систем
пунктів управління Повітряних Сил

Захист відбудеться “12” березня 2021 р. о 15⁰⁰ 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 “03” лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Доплерівські метеорологічні радіолокатори (ДМРЛ) є сучасним технічним засобом для оперативних спостережень за станом атмосфери. В імпульсних елементах розділення простору, що входять до їх зони відповідальності, ДМРЛ оцінюють три базових параметри відбиттів від метеорологічних утворень (МУ), що спостерігаються, й обчислюють ряд метеорологічних продуктів. Такими базовими параметрами є середня потужність відбиттів від МУ (або пов'язана з нею радіолокаційна відбиваність МУ), середня радіальна швидкість руху і ширина доплерівського спектру швидкостей (ДСШ) МУ. Оцінювати ці параметри часто необхідно на фоні не лише власного шуму каналів приймання ДМРЛ, а і його адитивної суміші із завадними відбиттями від нерухомих предметів місцевості чи точкових за дальністю рухомих повітряних об'єктів (ПО), зокрема, літаків цивільної авіації, гелікоптерів тощо. У складі ДМРЛ перелічені задачі розв'язують системи первинної міжперіодної обробки (МПО), яким і присвячене дисертаційне дослідження.

Важливою особливістю первинної МПО сигналів ДМРЛ є те, що її різні завдання часто полягають у відшукуванні тих чи інших функцій кореляційної матриці (КМ) міжперіодних флуктуацій відбиттів зондувального сигналу радіолокатору в елементах розділення простору, що спостерігаються. При цьому кінцеві результати розв'язання однієї задачі МПО можуть бути проміжним етапом розв'язання іншого завдання обробки. Це створює передумови уніфікувати структуру системи МПО сигналів ДМРЛ таким чином, щоби усі задачі МПО вирішувались в обчислювально економний спосіб, коли їх спільні операції виконувались би лише один раз.

Уніфікувати операції МПО сигналів ДМРЛ є також важливим для того, щоб реалізувати її на сучасній цифровій обчислювальній базі, зокрема, цифрових сигнальних процесорах і програмованих логічних інтегральних схемах, для роботи у режимі реального часу. Для операцій над КМ радіолокаційних сигналів така уніфікація є доцільною на єдиній структурно-алгоритмічній базі універсальних адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ), які забезпечують простоту практичної реалізації та обчислювальну стійкість результатів.

Тому *актуальними науковими та технічними задачами* є синтез на основі АРФ та аналіз ефективності описаних уніфікованих систем первинної МПО сигналів ДМРЛ. Ці задачі ставляться і розв'язуються у дисертаційній роботі.

Об'єкт дослідження – процес первинної міжперіодної обробки сигналів ДМРЛ із довільними законами зондування.

Предмет дослідження – методи первинної міжперіодної обробки сигналів ДМРЛ та оцінювання енергетичних і доплерівських параметрів метеорологічних утворень на фоні власного шуму каналів приймання і завадних відбиттів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження пов'язані із Державною цільовою науково-технічною програмою створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження), затвердженою постановою № 834 Кабінету Міністрів України від 17 вересня 2008 р., і планами

наукових робіт, які виконано у Харківському національному університеті радіоелектроніки і в яких здобувач був співвиконавцем. До них належать 10 науково-дослідних робіт (за № д/р 0109U001636, № д/р 0110U003509 (шифр “Град-ХНУРЕ”), № д/р 0111U002629, № д/р 0113U00360, № д/р 0114U002699, № д/р 0108U010950 (шифр “Метео-Х”), № д/р 0110U001664 (шифр “Метео-ХС”), за договорами № 5/921-юр (шифр “Пространство-В”), № 56К/2012, № 65К/2013 (шифр “Рівень”)), 2 дослідно-конструкторські роботи (за № д/р 0109U001633 (шифр “Фенікс-Х”), № д/р 0109U001906 (шифр “Протазан-Х”)) і 2 науково-технічні роботи (за № д/р 0113U007342, № д/р 0115U006732), до звітів про які увійшли результати дисертаційних досліджень.

Мета роботи – підвищити точність оцінювання базових параметрів метеорологічних утворень у різних сигнально-завадових умовах і знизити обчислювальну складність практичної реалізації систем первинної МПО сигналів ДМРЛ.

Для досягнення цієї мети було розв’язано такі науково-технічні **задачі**.

1. Обґрунтувати методи оцінювання параметрів відбиттів від метеорологічних утворень, зокрема, їх середньої потужності, середньої радіальної швидкості і ширини доплерівського спектру швидкостей, доцільні для використання у ДМРЛ із довільними законами зондування, для цього:

- отримати теоретичні та емпіричні закони розподілу та їх моменти для ряду оцінок коефіцієнту міжперіодної кореляції відліків відбиттів від МУ;
- отримати теоретичні та емпіричні закони розподілу ряду відомих і нових оцінок енергетичних і доплерівських параметрів відбиттів від МУ;
- проаналізувати та порівняти характеристики точності оцінок параметрів МУ на основі їх законів розподілу;
- обґрунтувати принцип і кратність вобуляції інтервалів зондування, доцільні для оцінювання швидкості МУ із заданими показниками точності;
- обґрунтувати вимоги до об’єму навчаючої вибірки відбиттів від МУ, необхідного для оцінювання параметрів МУ з питомою точністю.

2. Синтезувати методи мінімізації негативного впливу завад від нерухомих предметів місцевості і рухомих точкових за дальністю повітряних об’єктів на точність оцінювання параметрів МУ на їх фоні. Для цього:

- кількісно проаналізувати вплив на точність оцінювання параметрів МУ завадних відбиттів від предметів місцевості і точкових повітряних об’єктів, які можуть бути наявними у вхідному сигналі системи МПО ДМРЛ;
- обґрунтувати метод синтезу фільтру заглушення відбиттів від предметів місцевості, що має регульовані ширину і глибину зони режекції;
- обґрунтувати методи виключення векторів завадних відбиттів від точкових ПО із навчаючої вибірки, за якою оцінюються параметри МУ;
- обґрунтувати методи виявлення (зокрема, квазіоптимальні) сигналів рухомих точкових ПО на фоні протяжних за дальністю відбиттів від МУ;
- для роботи в умовах вибірок даних малого об’єму обґрунтувати і кількісно проаналізувати ефективність методів підвищення енергетичної швидкодії МПО сигналів точкових ПО на фоні відбиттів від МУ, зокрема, за допомогою стрічково-діагональної регуляризації оцінок максимальної правдоподібності кореляційних

матриць відбиттів від МУ;

– кількісно проаналізувати ефективність синтезованих методів заглушення завадних відбиттів від предметів місцевості і точкових ПО.

3. Обґрунтувати структури і методи роботи уніфікованих систем МПО на основі АРФ для ДМРЛ із довільними законами зондування, для цього:

– обґрунтувати рекурентні методи формування оцінок параметрів МУ, доцільні для ДМРЛ із різними вимогами до темпу їх оновлення;

– обґрунтувати структуру й алгоритми роботи уніфікованої системи первинної МПО сигналів ДМРЛ, яка будується на єдиній структурно-алгоритмічній основі універсальних адаптивних решітчастих фільтрів і де завдання МПО розв’язуються в обчислювально економний спосіб, коли повторювані операції над КМ відбиттів виконуються лише один раз;

– проаналізувати ефективність роботи синтезованої уніфікованої системи МПО сигналів ДМРЛ на основі АРФ;

– для роботи у режимі реального часу обґрунтувати практичні рекомендації з реалізації на сучасних багатоядерних цифрових сигнальних процесорах синтезованих алгоритмів квазіоптимальної МПО когерентних пачкових сигналів на фоні пасивних завад на основі АРФ, що настроюються за “послідовним” рекурентним алгоритмом R -рангової модифікації.

Методи дослідження. Коректно застосовуючи наступні методи досліджень, було отримано наукові результати і сформульовано практичні рекомендації. На основі вивчення літератури встановлено сучасний стан науки і техніки за темою роботи, виявлено актуальні науково-прикладні завдання, що потребують розв’язання, і сформульовано мету і задачі дисертаційних досліджень. Методами статистичної радіотехніки, теорії імовірностей, математичної статистики, лінійної алгебри отримано аналітичні закони розподілу ряду оцінок модулю і фази комплексного коефіцієнту міжперіодної кореляції вхідних сигналів системи МПО ДМРЛ і оцінок параметрів МУ на їх основі. Методом математичного моделювання отримано емпіричні закони розподілу для тих оцінок параметрів відбиттів від МУ, для яких аналітичні формули отримати складно. Методами аналізу встановлено і порівняно характеристики точності й однозначності методів оцінювання параметрів МУ у різних сигнально-завадових умовах, за результатами чого обґрунтовано доцільні для практики оцінки параметрів МУ і методи заглушення завадних відбиттів. Методами синтезу розроблено рекурентні схеми й алгоритми, що реалізують обґрунтовані методи первинної МПО, та уніфіковану систему первинної МПО сигналів ДМРЛ на основі АРФ. Методом напівнатурного експерименту продемонстровано ефективність обґрунтованих методів і алгоритмів первинної МПО при обробці записів даних операційної РЛС.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше отримано аналітичні та емпіричні закони розподілу помилок оцінок середньої потужності, середньої радіальної швидкості та ширини спектру відбиттів від метеорологічних утворень для ДМРЛ із довільними (постійними і вобульованими) інтервалами зондування. Це дозволило порівняти ряд оцінок параметрів МУ на основі законів їх розподілу, а не лише моментів відповідних розподілів, як у більшості

відомих публікацій, та за результатами порівняння обґрунтувати нові оцінки із кращими від відомих характеристиками точності.

2. Набули подальшого розвитку адаптивні методи оцінювання параметрів метеорологічних утворень у ДМРЛ С-діапазону хвиль, а саме:

- синтезовано модифікацію методу парних імпульсів для ДМРЛ із поімпульсно та попачково вобульованими інтервалами зондування, яка порівняно із відомим методом дозволяє розширити діапазон однозначного оцінювання радіальної швидкості відбиттів від МУ до типово необхідного (± 50 м/с) або більшого;

- синтезовано модифікацію методу вимірювання ширини доплерівського спектру швидкостей відбиттів від МУ у ДМРЛ із постійними і вобульованими інтервалами зондування, в якій на відміну від відомих методів ширина ДСШ оцінюється не за двома коефіцієнтами міжперіодної кореляції відліків відбиттів, а за одним усередненим за пачкою коефіцієнтом кореляції Берга. Це дозволяє спростити процедуру оцінювання, знизити її помилки в середньому у два рази й уникнути комплексних (фізично беззмістовних) оцінок ширини спектру МУ, що їх в умовах вибірок даних скінченного об'єму можуть давати відомі алгоритми на основі двох коефіцієнтів кореляції.

3. Для імпульсних ДМРЛ С-діапазону хвиль набули подальшого розвитку відомі та синтезовано нові методи точного оцінювання параметрів МУ на фоні завадних відбиттів від предметів місцевості та точкових за дальністю ПО:

- запропоновано метод синтезу фільтру заглушення завадних відбиттів від нерухомих предметів місцевості, який на відміну від відомих дозволяє гнучко регулювати ширину і глибину зони режекції та не потребує змінювати структуру фільтру при зміні параметрів місцевих предметів, що спрощує відповідну обробку;

- запропоновано метод оцінювання параметрів МУ на фоні завадних відбиттів від рухомих точкових повітряних об'єктів, який на відміну від відомих полягає у попередньому виявленні сигналів точкових об'єктів на фоні МУ і подальшому виключенні сигнальних векторів із вибірки відбиттів від МУ, що дозволяє забезпечити необхідну точність оцінювання метеорологічних параметрів;

- запропоновано процедуру стрічково-діагональної регуляризації оцінок максимальної правдоподібності кореляційних матриць завадних відбиттів, яка порівняно з відомими методами адаптивної обробки дозволяє забезпечити більш високу енергетичну швидкодію синтезованих квазіоптимальних систем МПО сигналів точкових ПО на фоні МУ в умовах вибірок даних малого об'єму;

- вперше на основі аналітичних та емпіричних законів розподілу кількісно проаналізовано вплив завадних відбиттів на точність оцінювання параметрів МУ на їх фоні та ефективність запропонованих методів їх заглушення.

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

Практичне значення отриманих результатів. У роботі отримано наступні нові результати, які мають практичне значення:

- рекомендації з добору принципу і кратності вобуляції інтервалів зондування ДМРЛ і об'єму навчаючої вибірки відбиттів, які забезпечують оцінювання енергетичних і доплерівських параметрів МУ із точністю ± 1 дБ і ± 1 м/с відповідно;
- рекомендації з вибору методів оцінювання коефіцієнту міжперіодної кореляції відбиттів від МУ й енергетичних і доплерівських параметрів МУ на його основі, які забезпечують робастне вимірювання параметрів МУ із заданою точністю;
- метод синтезу неадаптивного фільтру заглушення завадних відбиттів від предметів місцевості, який має регульовані ширину і глибину зони режекції, забезпечує ефективне заглушення завад і є простим у реалізації;
- рекомендації з добору параметрів стрічково-діагональної регуляризації оцінок максимальної правдоподібності КМ завадних відбиттів на основі принципу “очікуваної правдоподібності”, які забезпечують високу швидкодію систем МПО гаусових сигналів на фоні гаусових завад в умовах вибірок даних малого об'єму;
- алгоритм і математична програма квазіоптимальної МПО когерентних пачкових сигналів на фоні гаусових завад на основі АРФ, що настроюється за “послідовним” рекурентним алгоритмом R -рангової модифікації, які дозволяють реалізувати обробку у режимі реального часу на базі багатоядерного цифрового сигнального процесору;
- рекурентні методи і схеми оцінювання параметрів МУ, які забезпечують низьку обчислювальну складність системи МПО сигналів ДМРЛ;
- рекомендації з побудови систем первинної МПО сигналів ДМРЛ на уніфікованій основі АРФ, які спрощують обробку, виконуючи спільні її операції лише один раз.

Отримані в дисертації результати стосовно побудови систем первинної МПО на уніфікованій основі АРФ і методів обробки сигналів у них впроваджено і плануються до використання у провідних підприємствах України, що розробляють радіолокаційну техніку – Державному підприємстві Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем “Квант-Радіолокація” (м. Київ) і Казенному підприємстві “Науково-виробничий комплекс “Іскра” (м. Запоріжжя), що засвідчено актами про впровадження № 20-37 від 23.01.2017 р., № 599/128/186 і № 600/128/186 від 13.06.2019 р.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації отримано здобувачем особисто або у співавторстві з науковим керівником і колегами з Проблемної науково-дослідної лабораторії Радіолокаційних систем спостереження ХНУРЕ. В усіх опублікованих роботах здобувач брав участь у постановці задач, їх розв'язанні, написанні програм математичного моделювання та власне моделюванні, обробці записів реальних даних, написанні та редагуванні текстів рукописів.

У статтях за темою дисертації, виконаних у співавторстві, особистий науковий і практичний внесок здобувача полягає у наступному. У роботі [1] виконано математичне моделювання і порівняльний аналіз граничних характеристик квазіоптимальних систем МПО гаусових сигналів на фоні гаусових пасивних завад. У [2] виконано математичне моделювання і порівняльний аналіз енергетичної швидкодії алгоритмів адаптивної обробки, що використовують типові та діагонально-регуляризовані оцінки максимальної правдоподібності КМ гаусових завад, стрічкову та стрічково-

діагональну регуляризацію матриці, оберненої до КМ завад. Обґрунтовано метод оцінювання параметрів регуляризації на основі принципу “очікуваної правдоподібності”. У [3, 4, 15] обґрунтовано алгоритми квазіоптимальної МПО гаусових когерентних і некогерентних сигналів на фоні гаусових завад на основі “послідовного” АРФ із алгоритмом R -рангової модифікації параметрів. У [5] отримано інтегральні подання для щільності і функції розподілу відносної помилки оцінювання середньої потужності відбиттів від МУ. Порівняно характеристики точності ряду оцінок параметрів МУ. У [7] отримано аналітичний вираз для щільності розподілу оцінки радіальної швидкості відбиттів від МУ. Обґрунтовано модифікацію методу парних імпульсів, яка розширює діапазон однозначного вимірювання швидкості. У [8] обґрунтовано оцінку ширини спектру МУ за одним коефіцієнтом кореляції Берга відбиттів. В обох роботах [7, 8] синтезовано схеми рекурентного за дальністю й азимутом обчислення радіальної швидкості та ширини спектру МУ. У [9, 14] для системи МПО, яка входить до складу системи просторово-часової обробки сигналів РЛС, обґрунтовано рекурентну організацію операцій МПО у “ковзному за дальністю” вікні. У [6, 10, 12] виконано аналітичний огляд параметричних методів оцінювання неперервних енергетичних спектрів відбиттів від МУ. У [13, 16] проаналізовано помилки оцінювання енергетичного спектру міжперіодних флуктуацій відбиттів від МУ непараметричними методами у випадках апіорі відомої та невідомої КМ відбиттів відповідно. У [11, 17] обґрунтовано модифікацію методу парних імпульсів, що забезпечує оцінювання радіальної швидкості МУ з питомою точністю та однозначністю. Порівняно точність вимірювання швидкості при попачковій і поімпульсній вобуляції інтервалів зондування ДМРЛ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи викладено і обговорено на 18 наукових і науково-технічних конференціях (19 доповідей індексовано у наукометричній базі Scopus): IX Міжнародна наукова конференція студентів та молодих учених “ПОЛІТ” (8–10 квітня 2009 р., м. Київ) [18]; Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” РТ-2010 (19–24 квітня 2010 р., м. Севастополь) [19], РТ-2011 (11–15 квітня 2011 р., м. Севастополь) [22]; Xth International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” TCSET’2010 (23–27 лютого 2010 р., м. Славське) [20]; 6th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop SAM 2010 (4–7 жовтня 2010 р., Kibutz Ma’ale Hahamisha, Israel) [21]; Signal Processing Symposium SPS 2011 (8–10 червня 2011 р., Jachranka Village, Poland) [23]; Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium MRRS 2011 (25–27 серпня 2011 р., м. Київ) [24, 25, 26], MRRS 2014 (23–25 вересня 2014 р., м. Київ) [37]; International Radar Symposium IRS 2011 (7–9 вересня 2011 р., Leipzig, Germany) [27, 28], IRS 2013 (18–21 червня 2013 р., Dresden, Germany) [31], IRS 2014 (16–18 червня 2014 р., Gdansk, Poland) [34, 35, 36], IRS 2015 (24–26 червня 2015 р., Dresden, Germany) [41], IRS 2017 (28–30 червня 2017 р., Prague, Czech Republic) [42]; 16-й Міжнародний молодіжний форум “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (17–19 квітня 2012 р., м. Харків) [29]; Noise Radar Technology NRT-2012 (27–29 вересня 2012 р., м. Ялта) [30]; The IXth International Conference on Antenna Theory and

Techniques ICATT 2013 (16–20 вересня 2013 р., м. Одеса) [32, 33]; The 11th European Radar Conference EuRAD-2014 (8–10 жовтня 2014 р., Rome, Italy) [38]; The 2015 IEEE International Radar Conference (10–15 травня 2015 р., Arlington, USA) [39, 40].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних позначень, символів, скорочень, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 13 додатків. Загальний обсяг дисертації – 289 сторінок друкованого тексту, із яких обсяг основного тексту – 159 сторінок. Роботу проілюстровано 120 рисунками (із них 40 на 20 окремих сторінках) і 17 таблицями (із них 13 на 5 окремих сторінках). Список використаних джерел включає 260 найменувань.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 16 статтях (із них 7 індексовано наукометричною базою Scopus) у науково-технічних журналах, включених до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Міністерством освіти і науки України, 25 доповідях (із них 19 індексовано наукометричною базою Scopus) у збірниках праць міжнародних наукових і науково-технічних конференцій і включено до звітів про 10 науково-дослідних, 2 дослідно-конструкторські і 2 науково-технічні роботи. Отримано 1 патент України на корисну модель.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дослідження, зазначається її зв'язок із науковими програмами, планами, темами. Формулюються об'єкт, предмет, мета і завдання дисертаційних досліджень. Описуються методи дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих у роботі результатів. Наводяться відомості про апробацію матеріалів дисертації, публікації за її темою та особистий внесок здобувача у них. Коротко аноншуються структура та обсяг дисертації.

Перший розділ присвячено важливому завданню системи МПО (рис. 2) у складі ДМРЛ (рис. 1) – оцінюванню трьох параметрів відбиттів від МУ, а саме їх середньої потужності σ_{av}^2 , середньої радіальної швидкості V та ширини W ДСШ [40]. Мета розділу – обґрунтувати методи оцінювання зазначених параметрів, які задовольняють заданим вимогам точності й однозначності та є доцільними для ДМРЛ із довільними законами зондування (рис. 3). Розглядаються відомі і ряд нових оцінок часової області, зокрема, на основі методу парних імпульсів (МПІ). Критеріями їх точності у роботі служать середні значення, середньоквадратичні відхилення (СКВ) і 90% довірчі інтервали випадкових відносних і абсолютних помилок [7, 8]

$$\hat{\varepsilon} = (\hat{\sigma}_{av}^2 - \sigma_{av}^2) / \sigma_{av}^2, \quad \hat{\delta} = \hat{V} - V, \quad \hat{\delta} = (\hat{W} - W) / W. \quad (1)$$

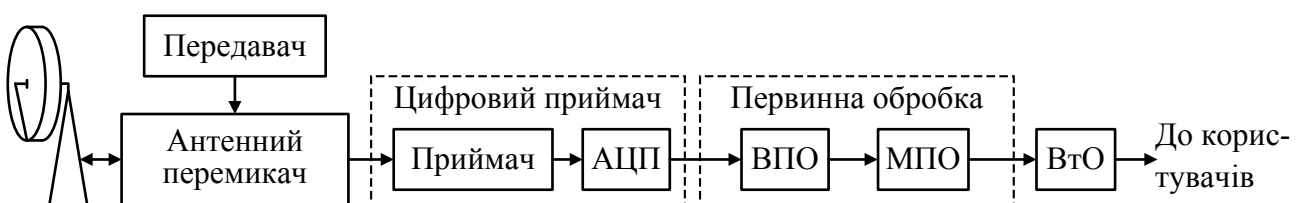


Рис. 1. Збільшена структурна схема імпульсного ДМРЛ (АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ВПО – внутрішньоперіодна обробка, ВтО – вторинна обробка)

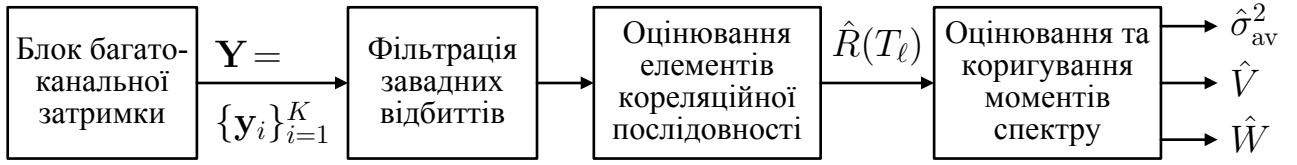


Рис. 2. Структурна схема системи МПО сигналів ДМРЛ, яка розглядається

Точність оцінювання параметрів МУ залежить від виду оцінок, фізичних властивостей власне МУ (зокрема, потужності, виду та ступеня міжперіодної кореляції), об'єму та статистичних властивостей наявної навчаючої вибірки відбиттів від них. Вплив цих факторів вичерпно описується законами (щільностями та функціями) розподілу відповідних оцінок. Однак у відомих публікаціях властивості цих оцінок досліджують здебільшого на основі моментів (середнього та дисперсії) їх розподілів. Порівняно із відомими роботами у дисертації характеристики точності оцінок параметрів МУ обчислюються, аналізуються та порівнюються на основі аналітичних та емпіричних законів розподілу помилок (1), які попередньо відшукуються.

Параметри МУ обчислюються за елементами $M \times M$ вибіркової оцінки [5]

$$\hat{\Phi} = \{\hat{\varphi}_{\ell m}\}_{\ell, m=1}^M = \frac{1}{K} \cdot \mathbf{A}, \quad \mathbf{A} = \{a_{\ell m}\}_{\ell, m=1}^M = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^* = \sum_{i=1}^K \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^* \quad (2)$$

(апріорі невідомої) $M \times M$ кореляційної матриці

$$\Phi = \{\varphi_{\ell m}\}_{\ell, m=1}^M = \mathbf{I}_M + \eta^{(m)} \mathbf{p}^{(m)} + \gamma^{(c)} \eta^{(c)} \mathbf{p}^{(c)} + \gamma^{(t)} \eta^{(t)} \mathbf{p}^{(t)} \quad (3)$$

M -вимірних векторів міжперіодних флуктуацій [41]

$$\mathbf{y}_i = \{y_{\ell i}\}_{\ell=1}^M = \mathbf{y}_i^{(n)} + \mathbf{y}_i^{(m)} + \gamma^{(c)} \mathbf{y}_i^{(c)} + \gamma^{(t)} \mathbf{y}_i^{(t)}, \quad i \in 1, K \quad (4)$$

радіолокаційних відбиттів із елементів простору, що аналізуються. У (3) і далі $\mathbf{I}_M$ – $M \times M$ одинична КМ M -вимірного вектору некорельованих власних шумів каналів приймання ДМРЛ із однаковою (одиничною) потужністю $\eta^{(n)} = 1$; $\eta^{(m)} > 0$, $\eta^{(c)} > 0$, $\eta^{(t)} > 0$ і $\mathbf{p}^{(m)}$, $\mathbf{p}^{(c)}$, $\mathbf{p}^{(t)}$ – відповідно відносні (по відношенню до $\eta^{(n)}$) потужності і нормовані $M \times M$ КМ відбиттів від МУ, місцевих предметів і повітряних об'єктів; множники $\gamma^{(c)} = 0, 1$ і $\gamma^{(t)} = 0, 1$ описують наявність у векторах $\mathbf{y}_i$ (4) відбиттів двох останніх видів, які вважаються завадними на відміну від корисних метеовідбиттів.

У (4) M -вимірні вектори $\mathbf{y}_i^{(n)} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$, $\mathbf{y}_i^{(m)} \sim CN(\mathbf{0}, \eta^{(m)} \mathbf{p}^{(m)})$, $\mathbf{y}_i^{(c)} \sim CN(\mathbf{0}, \eta^{(c)} \mathbf{p}^{(c)})$, $\mathbf{y}_i^{(t)} \sim CN(\mathbf{0}, \eta^{(t)} \mathbf{p}^{(t)})$ кладуться взаємонезалежними гаусовими комплексними з нульовими векторами середніх значень і відповідними $M \times M$ КМ.

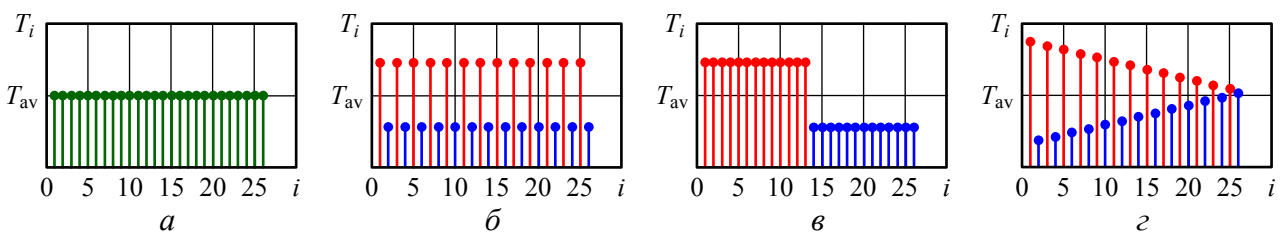


Рис. 3. Різновиди законів зондування, що досліджуються [5, 7, 8, 11]

У роботі вважається, що протяжні відбиття від місцевих предметів можуть бути присутні в усіх K елементах розділення за дальністю, де наявні МУ, а відбиття від повітряних об'єктів – тільки в одному з-поміж K k -му елементі дальності [41]. При цьому відбиття від МУ, місцевих предметів і точкових повітряних об'єктів апроксимуються дискретними процесами авторегресії різного (цілого) порядку $p \geq 1$ (АР- p) з єдиним p -кратним коренем характеристичного рівняння і, відповідно, унімодальними спектрами, що є симетричними відносно точки f_1 їх максимуму [8].

Оцінка $\hat{\Phi}$ (2) формується за $M \times K$ -вимірною навчаючою вибіркою [5, 7, 11, 41]

$$\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^K = \{y_{\ell i}\}_{\ell=1, i=1}^{M, K} \quad (5)$$

вхідних сигналів системи МПО (рис. 2), що приймаються в M суміжних інтервалах зондування із K суміжних елементів розділення за дальністю.

Оцінкою $\hat{\sigma}_{av}^2$ середньої потужності $\sigma_{av}^2 = \eta^{(n)} + \eta^{(m)}$ адитивної суміші шумів каналів приймання ДМРЛ і відбиттів від МУ служить випадкова величина [24, 37]

$$\hat{\sigma}_{av}^2 = \frac{1}{M} \text{tr}(\hat{\Phi}) = \frac{1}{MK} \text{tr}(\mathbf{A}) = \frac{1}{MK} \sum_{i=1}^K \|\mathbf{y}_i\|^2 = \frac{1}{MK} \sum_{i=1}^K \sum_{\ell=1}^M |y_{\ell i}|^2, \quad (6)$$

що є середнім арифметичним елементів головної діагоналі $M \times M$ оцінки $\hat{\Phi}$ (2).

Точність оцінки (6) у роботі характеризується щільністю (щ.р.) і функцією (ф.р.) розподілу випадкової відносної помилки [24, 37]

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}_{av}^2 - \sigma_{av}^2}{\sigma_{av}^2} = \hat{q} - 1, \quad \hat{q} = \frac{\hat{\sigma}_{av}^2}{\sigma_{av}^2} = \frac{\text{tr}(\hat{\Phi})}{\text{tr}(\Phi)} = \text{tr}(\mathbf{B}), \quad \mathbf{B} = \frac{\mathbf{A}}{K \text{tr}(\Phi)}, \quad \bar{\hat{q}} = 1, \quad (7)$$

де випадкова $M \times M$ матриця $\mathbf{B} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^*$, подібно до матриці $\mathbf{A}$ (2), сформована за K -вимірною вибіркою $\mathbf{V} = \{\mathbf{v}_i\}_{i=1}^K$ M -елементних взаємонезалежних векторів

$$\mathbf{v}_i = \frac{\mathbf{y}_i}{K \text{tr}(\Phi)} \sim CN(\mathbf{0}, \Phi_v), \quad \Phi_v = \frac{\Phi}{K \text{tr}(\Phi)}, \quad \overline{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j^*} = \mathbf{0}_M, \quad i \neq j, \quad (8)$$

а сумісний розподіл її елементів – комплексний розподіл Вішарта з КМ Φ_v (8).

На рис. 4 наведені залежності від коефіцієнту міжперіодної кореляції (к.к.) МУ $\rho^{(m)}(T_{av})$ ймовірності $P(|\hat{q}| \leq 1 \text{ дБ})$ оцінювання їх потужності із помилкою $\pm 1 \text{ дБ}$. Видно, що вона зростає, коли зменшуються к.к. $\rho^{(m)}(T_{av})$ відбиттів та їх істинна потужність $\eta^{(m)}$, а також збільшуються об'єм K вибірки $\mathbf{Y}$ (5) відбиттів від МУ і порядок p АР-процесу, що їх апроксимує [5, 24]. Із рис. 4а видно, що для АР-3 і АР- ∞ процесів імовірності $P(|\hat{q}| \leq 1 \text{ дБ})$ є близькими за “малих” $0.1 \leq \rho^{(m)}(T_{av}) \leq 0.5$ і “великих” $\rho^{(m)}(T_{av}) \geq 0.9$. Із ростом $K \geq 10$ вони практично збігаються для усіх $\rho^{(m)}(T_{av})$. В цілому, згідно з рис. 4 точність оцінювання потужності інтенсивних МУ ($\eta^{(m)} \geq 10 \text{ дБ}$) практично не залежить від виду їх кореляційної функції.

Рис. 4б, 4в показують, що для МУ із $\eta^{(m)} \leq 30 \text{ дБ}$ і к.к. $\rho^{(m)}(T_{av}) \leq 0.7$ навчаюча вибірка об'єму $K = 5$ уможливорює оцінювати їх потужність із помилкою, яка з

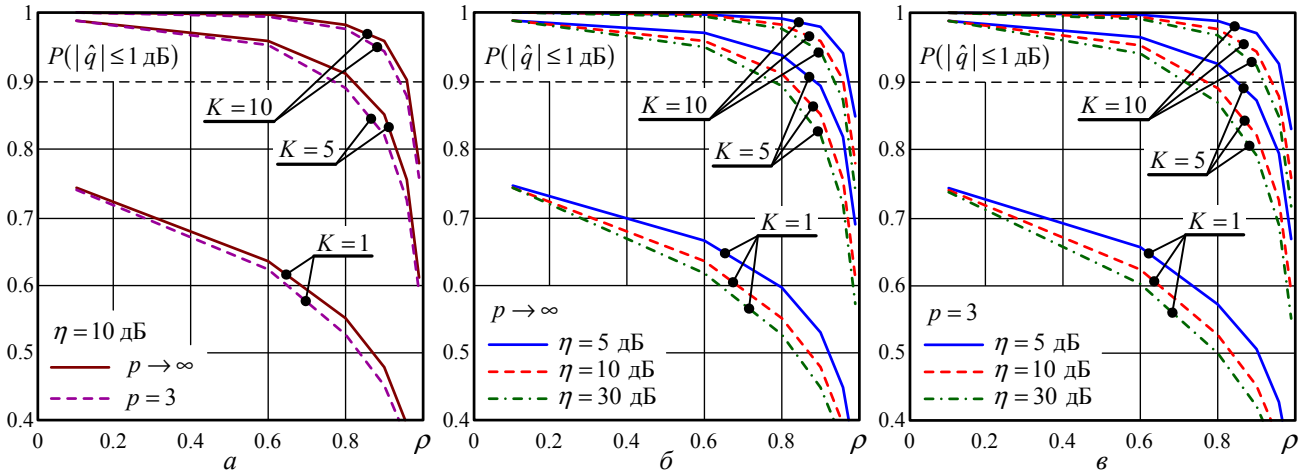


Рис. 4. Залежності ймовірності оцінювання потужності МУ із помилкою ± 1 дБ від коефіцієнту міжперіодної кореляції $\rho^{(m)}(T_{av}) = \rho$ [5, 24, 23, 28]

імовірністю 90% не перевищує ± 1 дБ. Вибірка такого об'єму не є достатньою, щоби оцінювати з тією ж точністю потужність більш інтенсивних ($\eta^{(m)} > 30$ дБ) та/або більш корельованих ($\rho^{(m)}(T_{av}) > 0.7$) відбиттів від МУ. Так, оцінювання із точністю ± 1 дБ потужності відносно інтенсивних ($\eta^{(m)} \leq 30$ дБ) відбиттів від МУ, чий к.к. сягає $\rho^{(m)}(T_{av}) = 0.9$, потребує навчаючої вибірки більшого об'єму $K = 10$ [5, 23].

У МПІ оцінка $\hat{V}$ середньої радіальної швидкості руху МУ [7]

$$\hat{V} = \lambda / (4 \pi T) \arg(\hat{r}), \quad \arg(\hat{r}) = \hat{\varphi}_T = \arctg(r''/r'), \quad \hat{r} = r' + j r'' \quad (9)$$

пропорційна фазі $\hat{\varphi}_T$ комплексного к.к. $\hat{r}$ відліків відбиттів, розділених інтервалом T . За постійних інтервалів зондування (рис. 3а) оцінка (9) може бути неоднозначною. Для боротьби із цим у ДМРЛ застосовують вобуляцію інтервалів зондування T_i , $i \in 1, M-1$, здебільшого двократну (T_1 і T_2 , $T_1 \neq T_2$) поімпульсну (рис. 3б) із відношенням інтервалів $3/4, 4/5, 2/3$ [7]. Оцінка швидкості при цьому [5, 25]

$$\hat{V}_\Delta = \frac{\lambda}{4 \pi \Delta} \arg_\Delta(\hat{r}), \quad \arg_\Delta(\hat{r}) = \arg(\hat{r}_1) - \arg(\hat{r}_2), \quad \Delta = T_1 - T_2, \quad T_1 \neq T_2, \quad (10)$$

де $\arg(\hat{r}_i)$ – фаза оцінки к.к. відліків відбиттів, розділених інтервалом T_i , $i \in 1, 2$. Подібно до (9) оцінка (10) є періодичною за швидкістю, проте не з діапазоном однозначності $\lambda/(2T)$, а з $\lambda/(2\Delta)$, який є у T/Δ разів більшим [7]. На основі (10) у роботі синтезовано модифікацію МПІ, яка дозволяє розширити діапазон однозначного оцінювання швидкості МУ до типово необхідного (± 50 м/с) або більшого [7].

Комбінуючи оцінки $\hat{V}$ (9), що мають високу точність, із оцінками $\hat{V}_\Delta$ (10), що мають широкий діапазон однозначності, у [11] синтезовано комбінований алгоритм оцінювання радіальної швидкості (КАОРШ), який поєднує переваги обидвох методів.

Порівнюючи ф.р. помилок $\hat{\delta}$ (1) алгоритму (10) (рис. 5) і КАОРШ (рис. 6), видно, що обидва алгоритми здатні оцінювати радіальні швидкості МУ в однаковому діапазоні однозначності $V_{0\Delta}$, проте останній є істотно точнішим від першого. У загальному випадку точність обидвох методів залежить від принципу вобуляції та порядку p АР-процесу, що апроксимує відбиття від МУ. При цьому поімпульсна

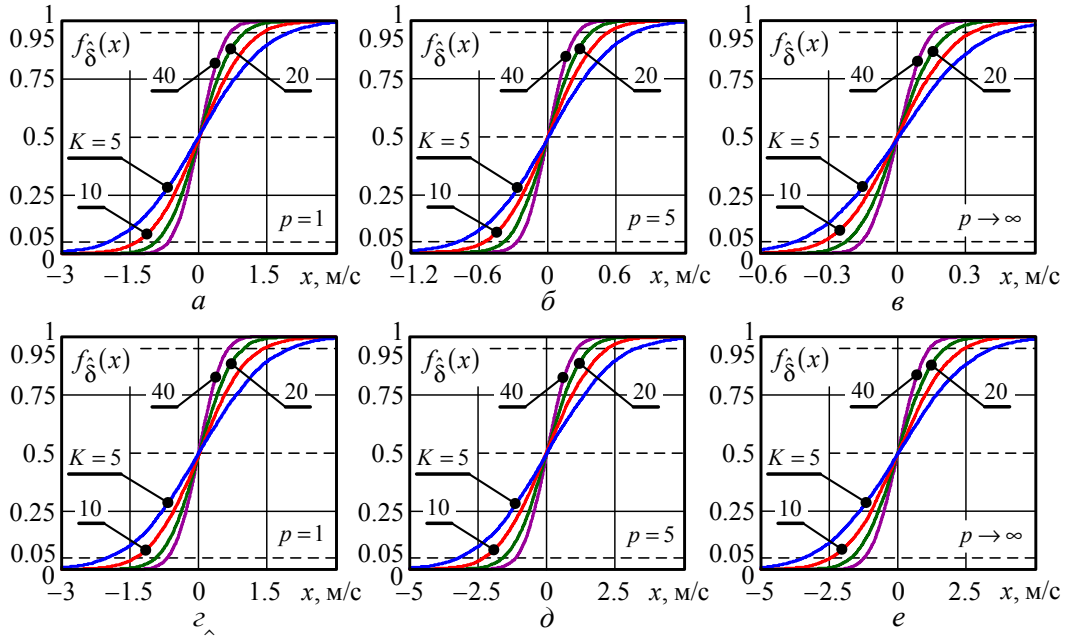


Рис. 5. Ф.р. помилок $\hat{\delta}$ (1) алгоритму (10) за поімпульсної (а – в) і попачкової (г – е) вобуляції: $\lambda \approx 5.3$ см, $V_{0\Delta} \approx 60$ м/с, $\eta^{(m)} = 30$ дБ, $\rho^{(m)}(T_{av}) = 0.9$, $p^{(m)} = 1$ (а, г), $p^{(m)} = 5$ (б, д), $p^{(m)} \rightarrow \infty$ (в, е) [11]

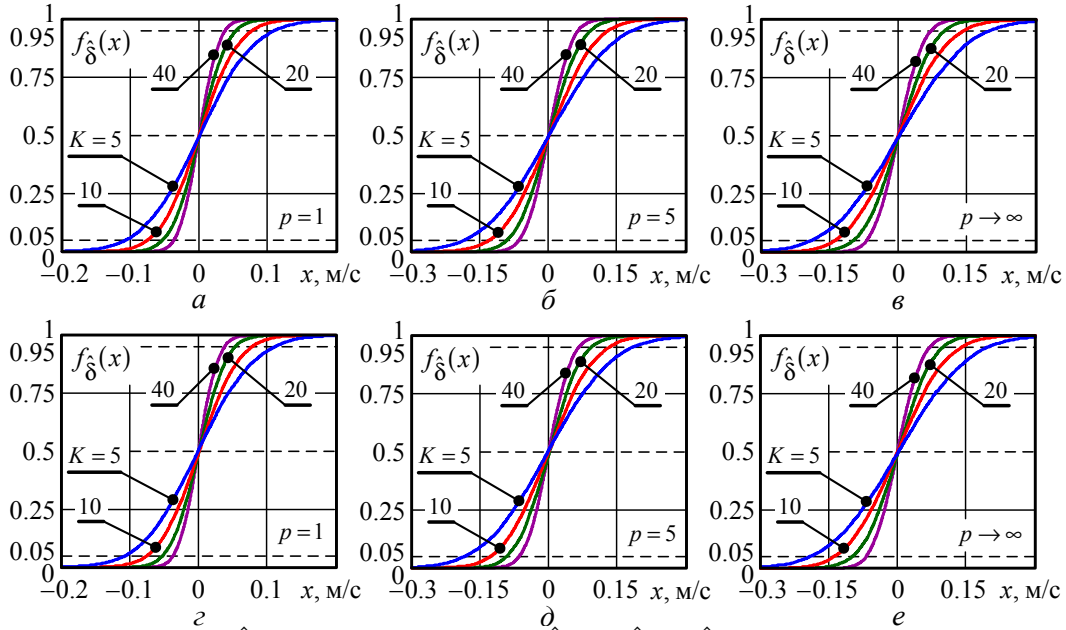


Рис. 6. Ф.р. помилок $\hat{\delta}$ (1) КАОРШ для $\hat{V} = (\hat{V}_1 + \hat{V}_2)/2$ за поімпульсної (а – в) і попачкової (г – е) вобуляції: $\lambda \approx 5.3$ см, $V_{0\Delta} \approx 60$ м/с, $\eta^{(m)} = 30$ дБ, $\rho^{(m)}(T_{av}) = 0.9$, $p^{(m)} = 1$ (а, г), $p^{(m)} = 5$ (б, д), $p^{(m)} \rightarrow \infty$ (в, е) [11]

вобуляція (рис. 3б) забезпечує менші помилки $\hat{\delta}$ (1), ніж попачкова (рис. 3в) [7]. Встановлено, що для $M \geq 20$ -елементних векторів відбиттів у (4) практично доцільною є $z \leq 4$ -кратна вобуляція. Також показано, що радіальну швидкість МУ доцільно вимірювати за усередненими за пачкою у (4) оцінками $\hat{r}$ апіорі рівних к.к. відбиттів від них. Цей спосіб забезпечує вищу точність порівняно із усередненням оцінок швидкості, побудованих за оцінками індивідуальних к.к., і стає більш ефективним зі зростанням кількості накопичуваних [5, 7, 25].

У МПІ ширина ДСШ МУ, який вважається унімодальним із гаусовою формою, відшукується за оцінками модулів $|\hat{r}_{\ell,m}|$ к.к. пар (ℓ -го і m -го) векторів вибірки $\mathbf{Y}$ (5) відбиттів від МУ, пов'язаними з відповідними елементами матриць $\hat{\Phi}$ і $\mathbf{A}$ (2) [5].

Досліджено шість оцінок модулів коефіцієнтів кореляції відліків, що розділені інтервалом часу kT (k -х коефіцієнтів кореляції) [8, 26, 28]: 1⁰ стандартні і 2⁰ модифіковані за Бергом, оцінки 3⁰ Ітакури – Саїто і 4⁰ Берга, 5⁰ оцінки k -х (ненормованих) кореляційних моментів і 6⁰ усереднених k -х кореляційних моментів. Проаналізовано три групи оцінок ширини ДСШ МУ, побудованих на їх основі.

Перша група включає оцінки А.1 – А.4, побудовані за одним к.к.,

$$\hat{W}_{\ell k} = \lambda / (4 \pi k T) \sqrt{-2 \ln (|\hat{r}(k T)_{\ell+k, \ell}|)}, \quad \ell \in 1, M - k \quad (11)$$

і оцінки А.5 – А.7, побудовані для $T_1 = T$, $T_2 = 2T$ за двома к.к.,

$$\hat{W}_{\ell k} = \lambda / (4 \pi T) \sqrt{2/3 \ln (|\hat{r}(T)_{\ell+1, \ell}| / |\hat{r}(2T)_{\ell+2, \ell}|)}, \quad \ell \in 1, M - 2. \quad (12)$$

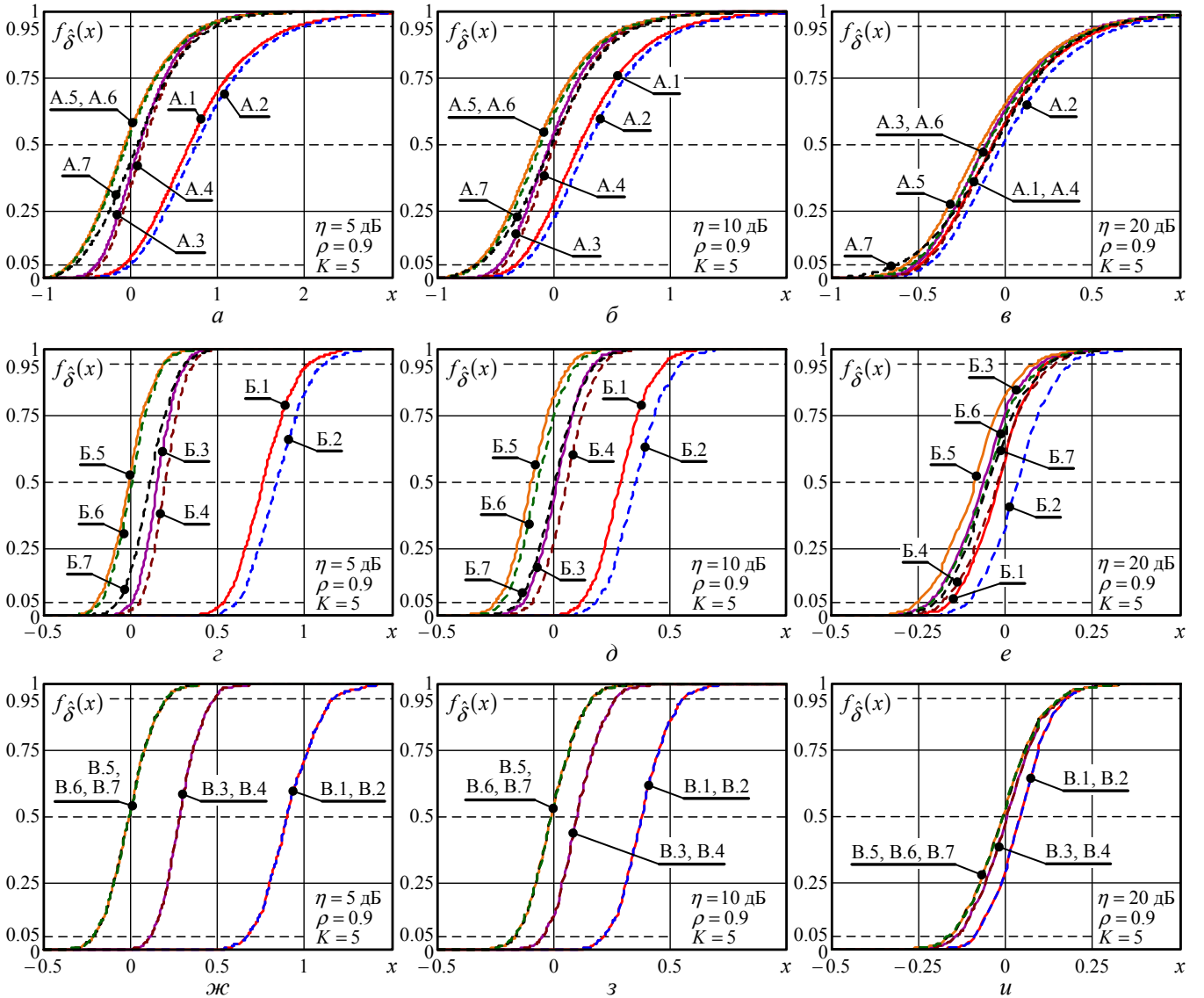


Рис. 7. Ф.р. відносних помилок $\hat{\delta}$ оцінювання ширини ДСШ на основі А.1 – А.7 (а – в), Б.1 – Б.7 (г – е), В.1 – В.7 (ж – и): $\lambda \approx 5.3$ см, $\rho^{(m)}(T_{av}) = 0.9$, $p^{(m)} \rightarrow \infty$ [5, 8, 26]

Оцінки другої групи (Б.1 – Б.7) отримано усередненням оцінок першої групи [8]

$$\hat{W}_{av} = \frac{1}{M-k} \sum_{\ell=1}^{M-k} \hat{W}_{\ell k}. \quad (13)$$

Третю групу утворюють оцінки В.1 – В.4 виду (11) і В.5 – В.7 виду (12), побудовані за одним і двома усередненими к.к. відповідно [8, 26].

Із наведених на рис. 7 емпіричних ф.р. відносних помилок $\hat{\delta}$ (1) оцінок $\hat{W}$ ширини ДСШ видно, що при однаковому об'ємі $K = 5$ навчаючої вибірки Y (5) відбиттів від МУ оцінки першої групи (А.1 – А.7) мають більші 90% довірчі інтервали, ніж оцінки другої (Б.1 – Б.7) та третьої (В.1 – В.7) груп. Встановлено, що, щоб зменшити 90% довірчі інтервали оцінок першої групи до величини інтервалів оцінок другої та третьої груп, для них необхідно збільшити об'єм K вибірки Y у $M/2 \dots M$ раз порівняно з іншими оцінками, що часто є практично неприпустимим [5, 23, 28].

Оцінки $\hat{W}$ ширини ДСШ виду (12) на основі двох к.к. із ненульовою ймовірністю, тим більшою, чим менше об'єм K вибірки Y (5), можуть давати комплексні значення ширини. Оцінки В.1 – В.7 третьої групи порівняно з оцінками Б.1 – Б.7 другої потребують обчислювати натуральний логарифм і квадратний корінь лише один раз, а не $M-1$ чи $M-2$, тому є значно простішими для практичної реалізації засобами цифрової обчислювальної техніки (зокрема, цифровими сигнальними процесорами (ЦСП) і програмованими логічними інтегральними схемами (ПЛІС)). Встановлено, що незалежно від закону зондування для вимірювання ширини W ДСШ МУ гаусової форми практично доцільною є оцінка $\hat{W}$ на основі усередненої оцінки Берга к.к., побудованої за елементами головної діагоналі і першої піддіагоналі матриці $\hat{\Phi}$ (2) [8].

Порівняно із першим розділом, де параметри МУ оцінювалися на фоні шуму каналів приймання ДМРЛ, у **другому розділі** розв'язується задача їх оцінювання на фоні завадних відбиттів від предметів місцевості та точкових за дальністю повітряних об'єктів (літаків цивільної авіації, гелікоптерів тощо). Їх наявність у вибірці Y (5) ускладнює первинну МПО сигналів і тим самим вирішення основних задач ДМРЛ у цілому, оскільки при цьому оцінюватимуться параметри (адитивної) суміші відбиттів від МУ та завадних сигналів, які можуть істотно відрізнитися від шуканих параметрів власне МУ. Мета розділу – кількісно проаналізувати вплив завадних відбиттів на точність оцінювання параметрів МУ й обґрунтувати доцільні методи знизити його.

Запропоновано метод синтезу режекторного фільтру завадних відбиттів від місцевих предметів (рис. 8), що дозволяє просто і гнучко регулювати ширину та глибину зони режекції [36]. На його основі досліджено підхід до заглушення завадних відбиттів шляхом включення на вході системи МПО відповідного фільтру (рис. 9).

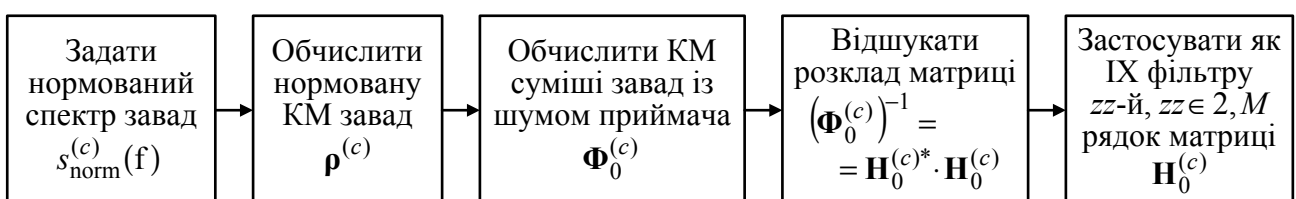


Рис. 8. Метод синтезу режекторного фільтру завад від предметів місцевості

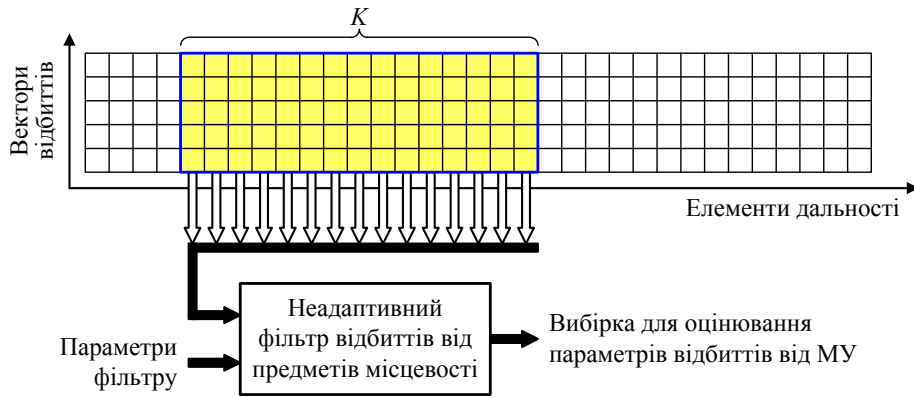


Рис. 9. Метод заглушення завадних відбиттів від предметів місцевості

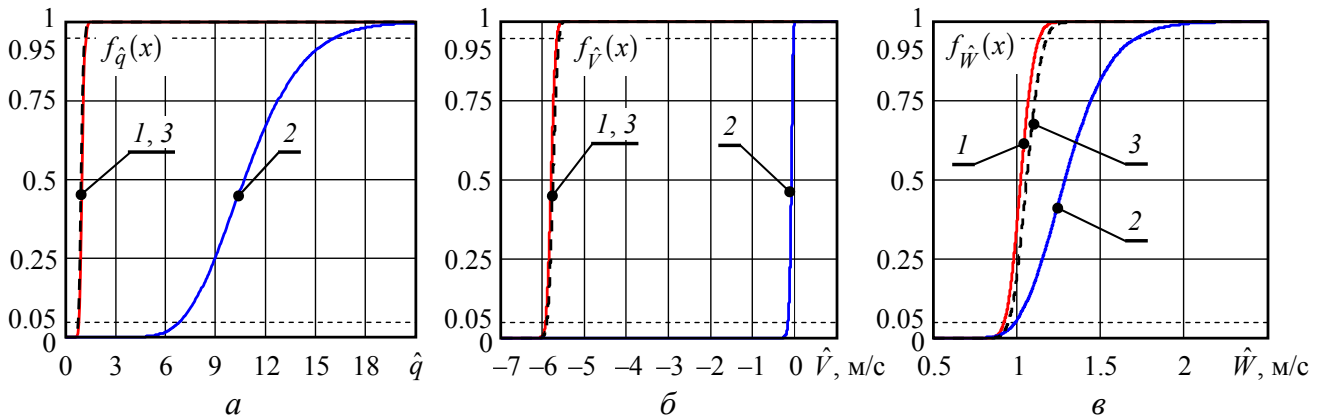


Рис. 10. Ф.р. оцінок потужності (а), швидкості (б) і ширини ДСШ (в) МУ: $M = 27$, $K = 10$, $\eta^{(m)} = 30$ дБ, $p^{(m)} = 10$, $\rho^{(m)}(T_{av}) = 0.9$, $V^{(m)} = -5.8$ м/с, $\eta^{(c)} = 40$ дБ, $p^{(c)} \rightarrow \infty$, $\rho^{(c)}(T_{av}) = 0.999$, $V^{(c)} = 0$ м/с [41]

На рис. 10 наведено ф.р. оцінок середньої потужності $\hat{q}$ (7) МУ, їх радіальної швидкості $\hat{V}$ і ширини ДСШ $\hat{W}$, які обчислено для випадків, коли вибірка $\mathbf{Y}$ (5) містить лише відбиття від МУ і власний шум приймача (криві 1), коли вона також включає завадні відбиття від нерухомих предметів місцевості (криві 2) і коли завадні відбиття заглушено методом рис. 9 (криві 3). Криві 2 показують, що наявність у вибірці $\mathbf{Y}$ (5) потужних завад від місцевості спотворює оцінки параметрів МУ, які стають зміщеними, їх дисперсія (90% довірчі інтервали) зростає, що у даному прикладі відповідає вимірюванню параметрів відбиттів від місцевості замість моментів спектру власне МУ. Заглушення завад режекторним фільтром рис. 9 відновлює практично таку ж точність оцінок (криві 3), як і у випадку власне МУ (криві 1) [41].

Завадні ж рухомі точкові за дальністю повітряні об'єкти запропоновано (рис. 11) попередньо виявити на фоні відбиттів від протяжних за дальністю МУ, після чого виключити відповідні вектори із вибірки $\mathbf{Y}$ (5), за якою оцінюються моменти спектру МУ [40, 41]. Для цього ролі “корисного” і “завадного” сигналів на вході системи МПО ДМРЛ умовно змінюються на протилежні та розв'язується типова задача селекції “корисних” рухомих цілей на фоні “завадних” відбиттів від МУ [1, 18, 19]. Криві 1 – 3 на рис. 12, що мають аналогічний сенс, як і на рис. 10, але тепер завадними є відбиття від точкових повітряних об'єктів, показують, що метод рис. 11 дозволяє відновити точність оцінювання параметрів МУ практично до бажаного рівня [41].

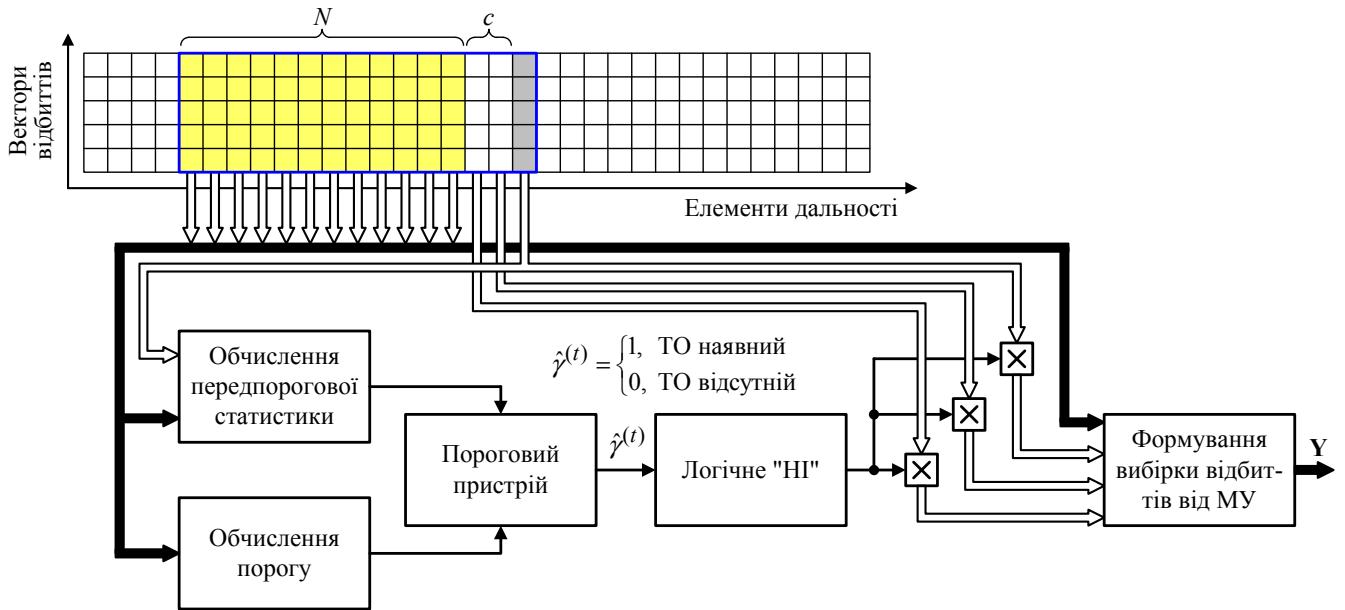


Рис. 11. Метод виключення векторів, де наявні точкові за дальністю повітряні об'єкти (ТО), із навчаючої вибірки відбиттів від МУ

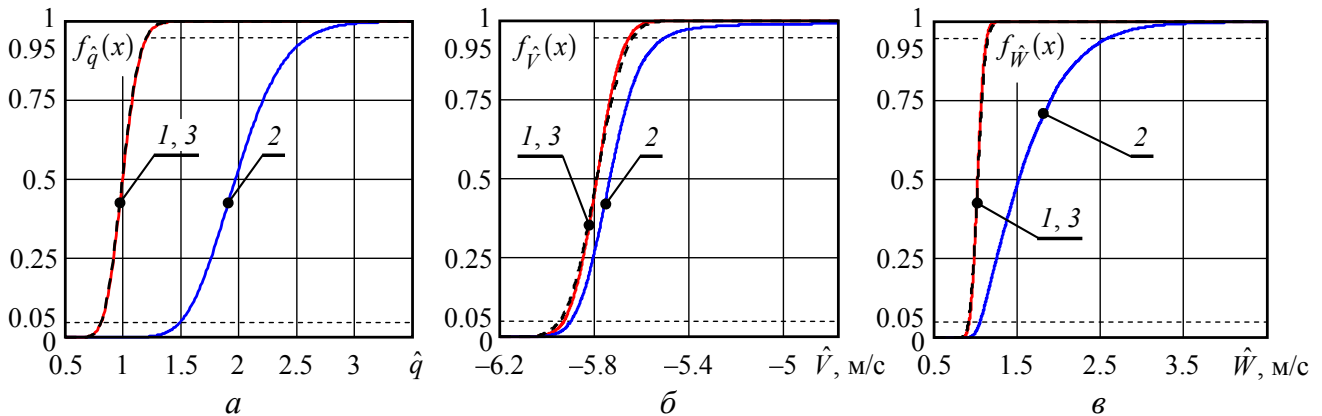


Рис. 12. Ф.р. оцінок потужності (а), швидкості (б) і ширини ДСШ (в) МУ: $M = 27$, $K = 10$, $\eta^{(m)} = 30$ дБ, $p^{(m)} = 10$, $\rho^{(m)}(T_{av}) = 0.9$, $V^{(m)} = -5.8$ м/с, $\eta^{(t)} = 20$ дБ, $V^{(t)} = 226.4$ м/с [41]

Мета **третього розділу** – синтезувати рекурентні методи реалізації алгоритмів первинної МПО, обґрунтованих у Розділах 1–2, а також синтезувати уніфіковану структуру системи МПО сигналів ДМРЛ, де усі задачі обробки розв'язуються на єдиній структурно-алгоритмічній основі універсальних АРФ.

У розділі синтезовано схеми, які економно рекурентного формують оцінки параметрів МУ і задовольняють таким вимогам до темпу їх оновлення [8]:

- *Випадок 1*: в усіх елементах дальності окремих кутів азимуту, що розділені шириною головної пелюстки діаграми спрямованості антени ДМРЛ;
- *Випадок 2*: в усіх елементах дальності усіх азимутальних напрямків.

При синтезі враховано, що при переході від одного елементу розділення ДМРЛ до наступного склад вибірки відбиттів Y (5) не змінюється повністю, а лише частково оновлюється. Це дозволяє не формувати при цьому оцінки параметрів МУ за повною новою вибіркою, а лише економно корегувати їх згідно зі змінами її складу [39].

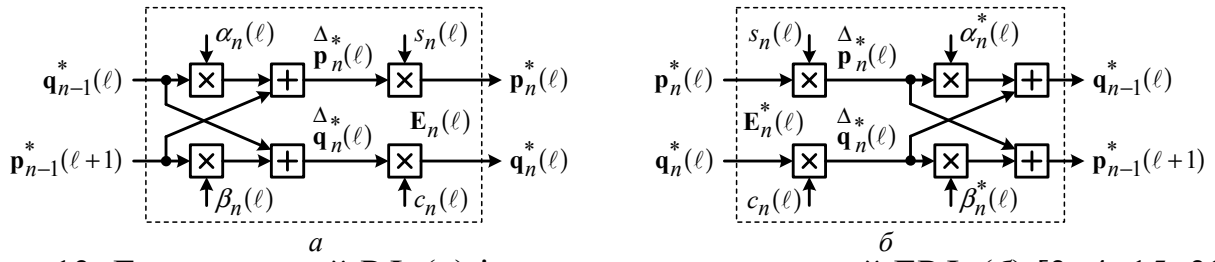


Рис. 13. Елементарний РФ (а) і комплексно-спряжений ЕРФ (б) [3, 4, 15, 39]

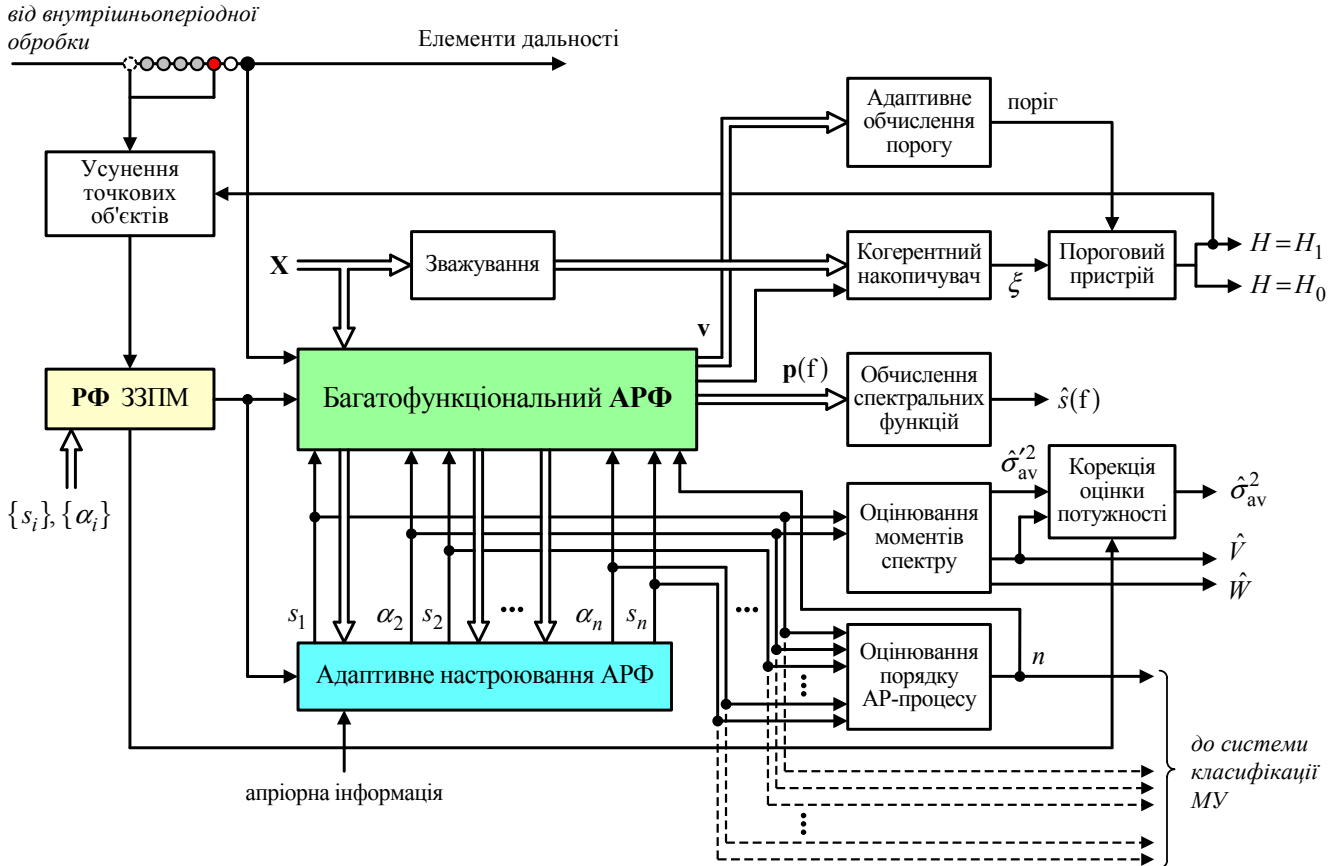


Рис. 14. Уніфікована структура системи первинної МПО сигналів ДМРЛ на основі універсальних АРФ [40, 41]

Суть проаналізованих у Розділах 1–2 операцій первинної МПО сигналів ДМРЛ – віднайти ті чи інші функції КМ міжперіодних флуктуацій вхідних сигналів системи МПО [40, 41]. При цьому фінальні шукані результати деяких операцій МПО можуть бути отримані на проміжних етапах розв’язання інших задач. Ураховуючи такий взаємозв’язок, синтезовано уніфіковану структуру системи первинної МПО сигналів ДМРЛ (рис. 14), де завдання, що дублюються, розв’язуються лише один раз [40].

У ній різні операції МПО виконуються на єдиній структурно-алгоритмічній базі універсальних АРФ, які будуються з набору нормувальних множників і елементарних решітчастих фільтрів (ЕРФ) – двовходових вагових суматорів із перехресними зв’язками (рис. 13) [2, 3]. Результатами напівнатурних експериментів продемонстровано ефективність схеми рис. 14 при заглушенні завад від предметів місцевості (ЗЗПМ) та оцінюванні параметрів відбиттів від МУ (рис. 15), а також при виявленні точкових за дальністю повітряних об’єктів на фоні протяжних МУ (рис. 16) [40].

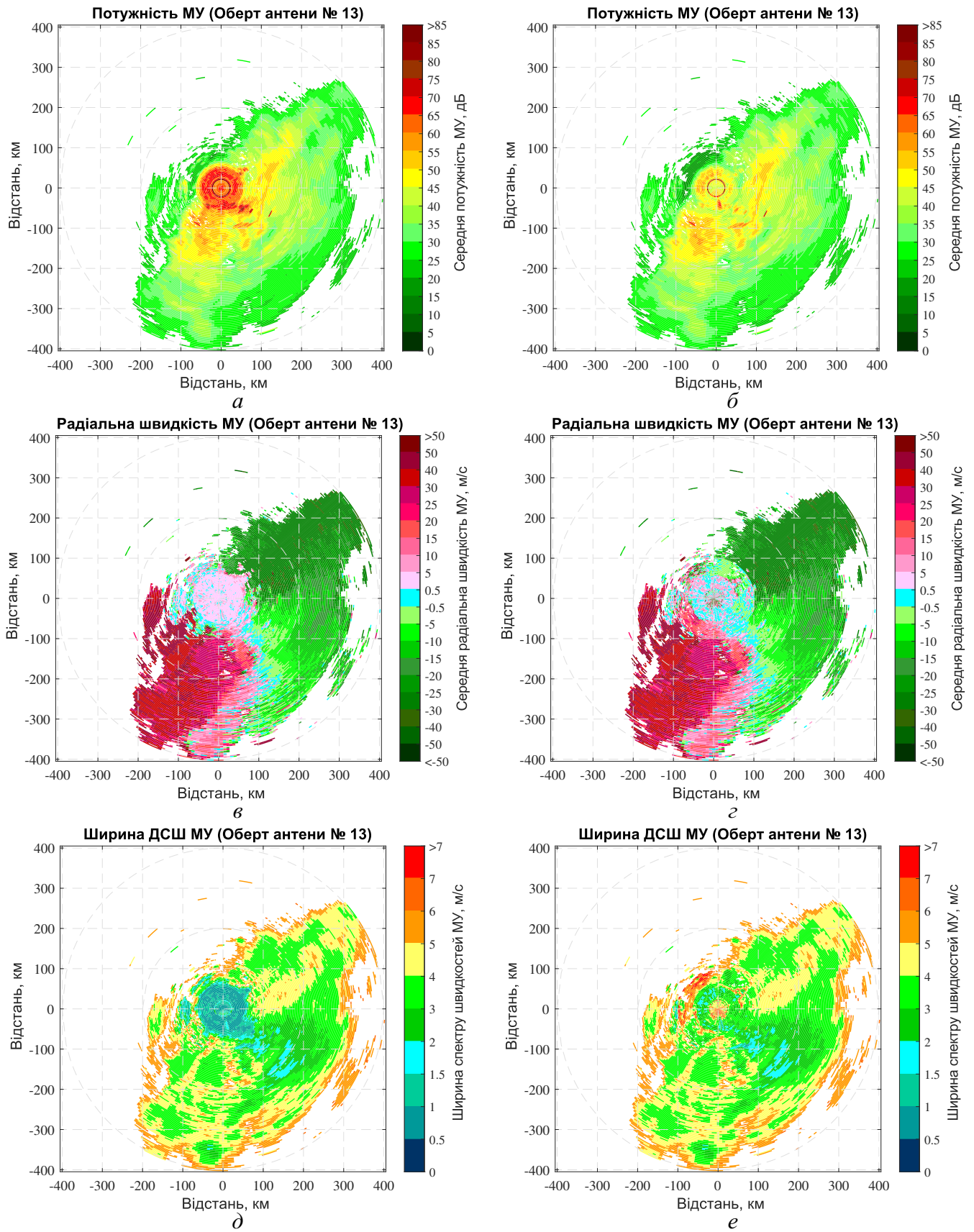


Рис. 15. Вигляд екранів ІКО з оцінками середньої потужності (*a*, *б*), радіальної швидкості (*в*, *г*) та ширини ДСШ МУ (*д*, *е*) при вимкненому (*a*, *в*, *д*) та увімкненому (*б*, *г*, *е*) фільтрі відбиттів від місцевості

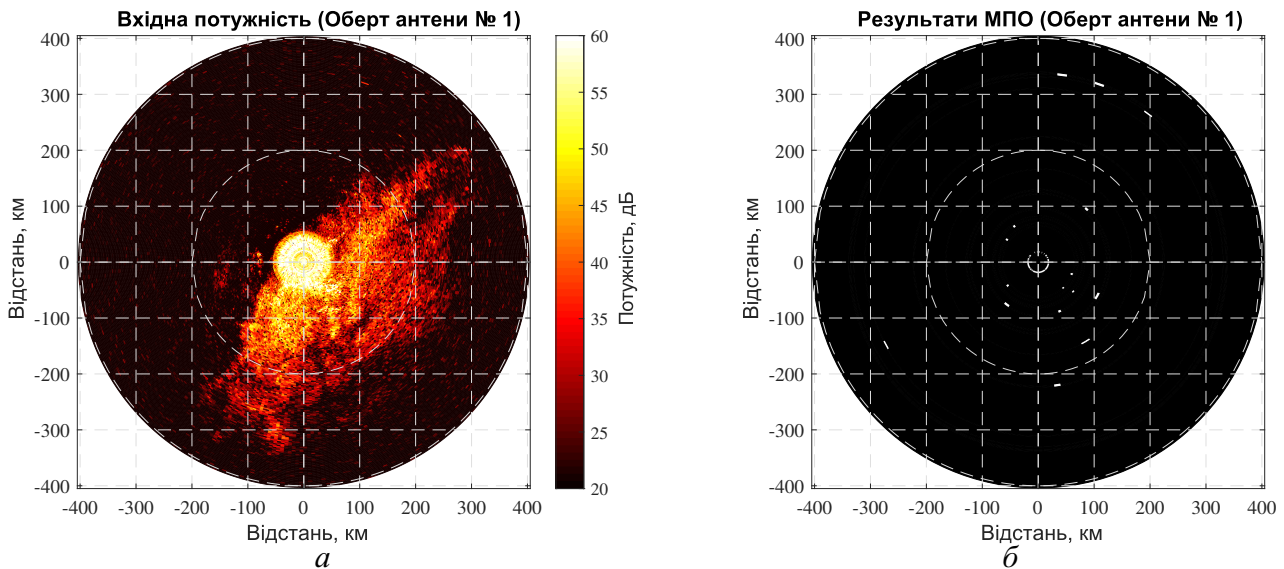


Рис. 16. Вигляд екранів ІКО при вимкненій (а) й увімкненій (б) системі МПО [39]

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу синтезу на основі адаптивних решітчастих фільтрів та аналізу ефективності уніфікованих систем первинної міжперіодної обробки сигналів імпульсних ДМРЛ із довільними (постійними і вобульованими) інтервалами зондування. Аналітично і методами математичного моделювання та напівнатурного експерименту проаналізовано статистичні характеристики відомих і ряду нових оцінок часової області (на основі методу парних імпульсів) трьох базових параметрів метеоутворень. За результатами запропоновано рекомендації з побудови систем первинної МПО сигналів ДМРЛ, які дозволили підвищити точність оцінювання базових параметрів МУ у різних сигнально-завадових умовах і знизити обчислювальну складність практичної реалізації систем первинної МПО ДМРЛ.

Отримано аналітичні та емпіричні закони розподілу помилок оцінок середньої потужності, середньої радіальної швидкості та ширини спектру відбиттів від МУ. На їх основі зіставлено характеристики точності ряду оцінок параметрів МУ. За результатами синтезовано дві модифікації методу парних імпульсів. Перша розширює діапазон однозначного оцінювання швидкості до типово необхідного (± 50 м/с) або більшого. У другій запропоновано нову оцінку ширини спектру МУ за одним усередненим за пачкою коефіцієнтом кореляції Берга, що спрощує процедуру оцінювання, знижує її помилки в середньому у два рази й дозволяє уникнути фізично беззмистовних оцінок.

Синтезовано методи заглушення завадних відбиттів від предметів місцевості та повітряних об'єктів, що забезпечують необхідну точність оцінювання параметрів МУ.

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

Зазначене дозволяє вважати, що задачі роботи виконано, а її мету досягнуто.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, де опубліковано основні наукові результати дисертації

1. 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.
2. Леховицкий Д. И., Абрамович Ю. И., Жуга Г. А., Рачков Д. С. Ленточно-диагональная регуляризация МП оценок корреляционных матриц гауссовых помех в алгоритмах адаптации антенных решеток. *Прикладная радиоэлектроника*. 2010. Т. 9, № 1. С. 107–121.
3. 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*. 2011. Т. 10, № 4. С. 380–404.
4. 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*. 2011. Т. 10, № 4. С. 405–418.
5. Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Lekhovyt'skiy D. I. Estimation of the meteorological formations parameters in pulsed Doppler weather radars with arbitrary staggering of pulse repetition intervals. *Proc. SPIE*. 2011. Vol. 8008. P. 80081Q/1–80081Q/12. DOI: 10.1117/12.905098.
6. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Атаманский Д. В. Параметрические методы оценивания спектров отражений от метеообразований. *Системи обробки інформації*. 2011. № 5 (95). С. 67–78.
7. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Атаманский Д. В., Пушков А. А. Модифицированный метод парных импульсов для когерентных импульсных МРЛ с произвольными интервалами зондирования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2012. № 3. С. 25–44.
8. Леховицкий Д. И., Рачков Д. С., Семеняка А. В., Атаманский Д. В., Пушков А. А. Оценка ширины доплеровского спектра скоростей метеообразований в когерентных импульсных МРЛ с произвольными интервалами зондирования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2012. № 8. С. 47–66.
9. Ryabukha V. P., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Katiushyn Ie. A. Estimation of spatial weight vector fixation interval for sequential space-time signal processing against the background of combined interferences. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2012. Vol. 55, № 10. P. 443–451. DOI: 10.3103/S0735272712100020.
10. Lekhovyt'skiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Atamanskiy D. V. On methods for estimation of random processes spectra. *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* 2013. Vol. 12, № 1. P. 64–71.
11. Lekhovyt'skiy D. I., Atamanskiy D. V., Rachkov D. S., Semeniaka A. V. Improvement of accuracy of meteorological objects velocity unambiguous measurement in Doppler weather radars with staggered pulse repetition times. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2015. Vol. 58, № 9. P. 385–403. DOI: 10.3103/S0735272715090010.

12. Lekhovyt'skiy D. I., Atamanskiy D. V., Rachkov D. S., Semeniaka A. V. Estimation of the energy spectrums of reflections in pulse Doppler weather radars. Part 1. Modifications of the spectral estimation algorithms. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2015. Vol. 58, № 12. P. 523–550. DOI: 10.3103/S0735272715120018.

13. Lekhovyt'skiy D. I., Atamanskiy D. V., Rachkov D. S., Semeniaka A. V. Estimation of the energy spectrums of reflections in pulse Doppler weather radars. Part 2. Extreme performance. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2016. Vol. 59, № 9. P. 379–396. DOI: 10.3103/S0735272716090016.

14. Riabukha V. P., Semeniaka A. V., Rachkov D. S., Katiushyn Ye. A. Errors of target direction finding by radars with planar arrays under the influence of external noise radiations. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2016. Vol. 59, № 6. P. 244–250. DOI: 10.3103/S0735272716060029.

15. Леховицький Д. І., Рябуха В. П., Рачков Д. С., Семеняка А. В. Рекуррентні алгоритми налаштування адаптивних решітчатих фільтрів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*. 2016. № 2–3. С. 26–32. DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.26.

16. Lekhovyt'skiy D. I., Atamanskiy D. V., Rachkov D. S., Semeniaka A. V. Estimation of the energy spectrums of reflections in pulse Doppler weather radars. Part 3. Statistical analysis of the reconstruction techniques of continuous spectrums of the reflections from meteorological objects. *Radioelectron. Commun. Syst.* 2017. Vol. 60, № 2. P. 47–79. DOI: 10.3103/S0735272717020017.

Патенти

17. Виявлювач-вимірювач доплерівських сигналів : пат. 74652 Україна : МПК G01S 13/58 (2006.01). Леховицький Д. І., Атаманський Д. В., Рачков Д. С., Семеняка А. В. № у 2012 03475 ; заявл. 23.03.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

18. Zhuga G. A., Rachkov D. S. The theoretical-experimental investigations of adaptive MTD systems in pulsed radar with batch-to-batch staggering of pulse repetition intervals. *IX Міжнар. наук. конф. студентів та молодих учених "ПОЛІТ"* : матеріали конф., 8–10 квітня 2009 р. Київ : НАУ, 2009. С. 195.

19. Рачков Д. С. Повышение быстродействия адаптивной обработки на основе ленточно-диагональной регуляризации максимально правдоподобных оценок корреляционных матриц гауссовых помех. *6-я Междунар. молодежн. научн.-техн. конф. "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010"* : материалы конф., 19–24 апреля 2010 г. Севастополь : СевНТУ, 2010. С. 96.

20. Lekhovyt'skiy D., Ryabukha V., Zarytskyi V., Zhuga G., Rachkov D., Semeniaka A. Adaptive lattice filters for band-inverse covariance matrix approximations. *Xth Int. Conf. "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science"* : proc., 23–27 February 2010. Lviv–Slavske, Ukraine, 2010. P. 338.

21. Lekhovyt'skiy D. I., Abramovich Y. I., Dokhov O. I., Zarytskyi V. I., Zhuga G. A., Rachkov D. S. Band-diagonal regularization of Gaussian interference covariance matrices ML estimates. *6th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop* :

proc., 4–7 October 2010. Kibbutz Ma'ale Hahamisha, Israel, 2010. P. 141–144. DOI: 10.1109/SAM.2010.5606721.

22. Рачков Д. С., Семеняка А. В., Жуга Г. А., Катюшин Е. А. Оценивание параметров метеообразований в импульсных доплеровских метеорадиолокаторах. *7-я Междунар. молодежн. научн.-техн. конф. “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011”* : материалы конф., 11–15 апреля 2011 г. Севастополь : СевНТУ, 2011. С. 48.

23. Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Lekhovytskiy D. I. Estimation of the meteorological formations parameters in pulsed Doppler weather radars with arbitrary staggering of pulse repetition intervals. *Signal Processing Symp. SPS 2011* : proc., 8–10 June 2011. Jachranka Village, Poland, 2011. CD-ROM, 12 p.

24. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Ryabukha V. P., Atamanskiy D. V. Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: mean power. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp.* : proc., 25–27 August 2011. Kyiv, Ukraine, 2011. P. 228–231. DOI: 10.1109/MRRS.2011.6053642.

25. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Ryabukha V. P., Atamanskiy D. V. Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: mean radial velocity. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp.* : proc., 25–27 August 2011. Kyiv, Ukraine, 2011. P. 232–235. DOI: 10.1109/MRRS.2011.6053643.

26. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Ryabukha V. P., Atamanskiy D. V. Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: spectrum width. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp.* : proc., 25–27 August 2011. Kyiv, Ukraine, 2011. P. 236–239. DOI: 10.1109/MRRS.2011.6053644.

27. Laurukevich U., Pushkov A., Vylegzhanin I., Vovshin B., Lekhovytskiy D., Rachkov D. Estimation of energy, spectral and polarimetric characteristics of meteorological echoes in DMRL-C. *Int. Radar Symp. IRS 2011* : proc., 7–9 September 2011. Leipzig, Germany, 2011. P. 267–272.

28. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Laurukevich U. U., Pushkov A. A. Statistical analysis of estimation accuracy of the meteorological formations parameters in pulsed Doppler weather radars with arbitrary staggering of pulse repetition intervals. *Int. Radar Symp. IRS 2011* : proc., 7–9 September 2011. Leipzig, Germany, 2011. P. 273–278.

29. Рачков Д. С. Однозначное измерение с повышенной точностью радиальной скорости метеообразований. *16-й Междунар. молодежн. форум “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”* : материалы конф., 17–19 апреля 2012 г. Харьков : ХНУРЕ, 2012. Т. 3. С. 140–141.

30. Lekhovytskiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Atamanskiy D. V. On methods for estimation of random processes spectra. *Noise Radar Technology NRT-2012* : proc., 27–29 September 2012. Yalta, Ukraine, 2012. 8 p.

31. Rachkov D. S., Lekhovytskiy D. I., Semeniaka A. V., Atamanskiy D. V., Laurukevich U. U., Pushkov A. A. Estimation of meteorological objects energy spectra in pulse Doppler weather radar. *Int. Radar Symp. IRS 2013* : proc., 18–21 June 2013. Dresden, Germany, 2013. Vol. 2. P. 811–817.

32. Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Lekhovyt'skiy D. I., Atamanskiy D. V. Estimation of continuous energy spectra of random echoes in coherent pulse radar. *The IXth Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques ICATT 2013* : proc., 16–20 September 2013. Odessa, Ukraine, 2013. P. 319–322. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650764.
33. Ryabukha V. P., Dokhov A. I., Zarytskiy V. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V., Katiushin Ie. A., Zarytskaia V. V. Convergence rate of a number of signal processing algorithms in adaptive arrays. *The IXth Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques ICATT 2013* : proc., 16–20 September 2013. Odessa, Ukraine, 2013. P. 304–306. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650759.
34. Lekhovyt'skiy 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. *15th Int. Radar Symp. IRS 2014* : proc., 16–18 June 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 25–30. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869195.
35. Rachkov D. S., Lekhovyt'skiy D. I., Semeniaka A. V., Vovshin B. M., Laurukevich U. U. Lattice implementation of “superresolving” methods for meteorological objects spectra estimation. *15th Int. Radar Symp. IRS 2014* : proc., 16–18 June 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 35–38. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869229.
36. Rachkov D. S., Lekhovyt'skiy D. I., Semeniaka A. V., Riabukha V. P., Atamanskiy D. V. Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar. *15th Int. Radar Symp. IRS 2014* : proc., 16–18 June 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 215–219. DOI: 10.1109/IRS.2014.6869251.
37. Rachkov D. S., Lekhovyt'skiy D. I., Semeniaka A. V. Statistical analysis of meteorological echoes mean power estimate. *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symp.* : proc., 23–25 September 2014. Kyiv, Ukraine, 2014. P. 22–25. DOI: 10.1109/MRRS.2014.6956656.
38. Semeniaka A. V., Lekhovyt'skiy D. I., Rachkov D. S. The systolic design of two-dimensional and multidimensional lattice filters for space-time signal processing. *The 11th European Radar Conf. EuRAD-2014* : proc., 8–10 October 2014. Rome, Italy. P. 545–548. DOI: 10.1109/EuRAD.2014.6991328.
39. Lekhovyt'skiy D. I., Rachkov D. S., Semeniaka A. V. K -rank modification of adaptive lattice filter parameters. *The 2015 IEEE Int. Radar Conf.* : proc., 10–15 May 2015. Arlington, USA. P. 127–132. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130983.
40. Rachkov D. S., Lekhovyt'skiy D. I. Lattice-filter-based unified structure of system for interperiod processing of weather radar signals. *The 2015 IEEE Int. Radar Conf.* : proc., 10–15 May 2015. Arlington, USA. P. 1234–1239. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7131183.
41. Rachkov D. S., Lekhovyt'skiy D. I., Semeniaka A. V., Riabukha V. P. Statistical analysis of ground clutter and point targets impact on accuracy of weather echoes parameters estimation. *The 16th Int. Radar Symp. IRS 2015* : proc., 24–26 June 2015. Dresden, Germany. P. 604–609. DOI: 10.1109/IRS.2015.7226400.
42. Lekhovyt'skiy D. I., Semeniaka A. V., Rachkov D. S. Statistical analysis of accuracy estimation of the continuous energy spectra in pulse Doppler weather radars. *The 18th Int. Radar Symp. IRS 2017* : proc., 28–30 June 2017. Prague, Czech Republic. 9 p. DOI: 10.23919/IRS.2017.8008175.

АНОТАЦІЯ

Рачков Д.С. Уніфіковані системи міжперіодної обробки та оцінювання параметрів сигналів доплерівських метеорадіолокаторів із довільними законами зондування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2020.

Проаналізовано методи первинної міжперіодної обробки (МПО) та оцінювання параметрів відбиттів від метеорологічних утворень (МУ) в імпульсних доплерівських метеорадіолокаторах (ДМРЛ) із довільними законами зондування. Досліджено відомі та нові оцінки трьох базових параметрів МУ й обґрунтовано доцільні для практики оцінки. Проаналізовано вплив на їх точність завадних відбиттів від предметів місцевості та точкових за дальністю повітряних об'єктів, запропоновано методи зменшити його. На основі адаптивних решітчастих фільтрів синтезовано уніфіковану структуру системи МПО, в якій спільні операції МПО виконуються лише один раз.

Ключові слова: міжперіодна обробка; метеорологічні утворення; завади від предметів місцевості; точкові рухомі об'єкти; оцінювання моментів спектру; заглушення завад від предметів місцевості; виявлення рухомих цілей; стрічково-діагональна регуляризація; адаптивний решітчастий фільтр; рекурентний алгоритм; R -рангова модифікація; уніфікована система.

АННОТАЦИЯ

Рачков Д.С. Унифицированные системы междупериодной обработки и оценивания параметров сигналов доплеровских метеорадиолокаторов с произвольными законами зондирования. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2020.

Проанализированы методы первичной междупериодной обработки (МПО) и оценивания параметров отражений от метеорообразований (МО) в импульсных доплеровских метеорадиолокаторах (ДМРЛ) с произвольными законами зондирования. Исследованы известные и новые оценки трех базовых параметров МО и обоснованы целесообразные для практики. Проанализировано влияние на их точность помеховых отражений от предметов местности и точечных по дальности воздушных объектов, предложены методы снизить его. На основе адаптивных решетчатых фильтров синтезирована унифицированная структура системы МПО, в которой повторяющиеся операции МПО выполняются лишь единожды.

Ключевые слова: междупериодная обработка; метеорологические образования; помехи от предметов местности; точечные движущиеся объекты; оценивание моментов спектра; подавление помех от предметов местности; обнаружение движущихся целей; ленточно-диагональная регуляризация; адаптивный решетчатый фильтр; рекурентный алгоритм; R -ранговая модификация; унифицированная система.

ABSTRACT

Rachkov D.S. Unified systems for interperiod signal processing and parameters estimation in Doppler weather radars with arbitrary sounding principles. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences with the specialization 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2020.

The dissertation addresses the methods for primary interperiod signal processing (IPP) and meteorological formations' (MF) parameters estimation in pulse Doppler weather radars (DWR) with arbitrary sounding principles. We analyze constant intervals of sounding as well as staggered ones, including pulse-to-pulse, batch-to-batch, and arbitrary staggering.

The well-known and new estimates of three MF parameters, namely, mean power, mean radial velocity, and Doppler spectrum width, are investigated. Theoretical and empirical statistical characteristics (probability density functions and cumulative distribution functions) of those estimates are determined. It is analyzed and compared how the accuracy of the estimates depends on the MF power, the type and level of interperiod correlation of MF echoes, and the size of MF training sample available. Based on the results of analysis, recommendations are made about the estimates most reasonable for practical applications.

A pulse-pair method modification is proposed for DWRs with staggered sounding intervals. It enables to extend the range of unambiguous velocity measurement. A two-fold pulse-to-pulse staggering is shown to yield the most accurate MF parameters estimates.

We analyze how the unwanted echoes from ground objects and point aerial targets affect the accuracy of MF parameters estimation. For the purpose of minimization of their destructive impact, the schemes are developed that suppress these different-nature interfering reflections. A method is proposed for synthesizing a finite-impulse-response ground clutter rejection filter with controlled width and depth of clutter rejection notches.

We develop a unified structure of the system for primary IPP of DWR signals. This structure uses a fact that different IPP operations, which aim at solving different DWR tasks, have common operations or even are intermediate steps in solving other tasks. Our proposed unified IPP system enables solving all the IPP tasks analyzed, while performing their common operations only once. Universal adaptive lattice filters with recurrent algorithms of $R \geq 1$ -rank parameter modification are used as a unified structural and algorithmic basis for this IPP system, as they are an effective yet numerically stable tool for computing different functions of covariance matrices of IPP system input signals. Performance of this unified IPP system is examined through mathematical simulations and scaled-down experiments using real data records, and respective results are presented.

Keywords: interperiod signal processing; Doppler weather radar; meteorological formations; stationary ground clutter; moving point objects; spectral moment estimation; mean power; mean radial velocity; Doppler spectrum width; probability density function; cumulative distribution function; ground clutter cancellation; moving target detection; band-diagonal regularization; recurrent algorithm; R -rank modification; adaptive lattice filter; unified system.

Підписано до друку 21.01.2021 р. Формат $60 \times 84^{1/16}$.
Умов. друк. арк. 1,4. Папір офсетний. Наклад 100 прим.

КП «Міська друкарня»
м. Харків, 61002, вул. Алчевських, 44.
Свідоцтво про державну реєстрацію
серія ДК, № 5495, від 22.08.2017 р.