

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**Семеняка Андрій Вікторович**

УДК 621.396.965

**КОМБІНОВАНІ АДАПТИВНІ СИСТЕМИ  
МІЖПЕРІОДНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ  
В ІМПУЛЬСНИХ ОГЛЯДОВИХ РЛС**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в науково-дослідному центрі Інтегрованих інформаційних радіоелектронних систем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Леховицький Давід Ісаакович**,  
головний науковий співробітник науково-дослідного центру Інтегрованих інформаційних радіоелектронних систем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Костенко Павло Юрійович**,  
професор кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації і посадки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба;

доктор технічних наук, професор  
**Кошевий Віталій Михайлович**,  
завідувач кафедри морського радіозв'язку  
Національного університету «Одеська морська академія».

Захист відбудеться « 10 » лютого 2017 року о 13-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки (61166, м. Харків, пр. Науки, 14).

З текстом дисертації можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки.

Автореферат розісланий « 10 » січня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Імпульсні оглядові РЛС різного призначення (трасові, аеродромні, бортові, метеорологічні тощо) вирішують важливі задачі інформаційного забезпечення широкого кола споживачів – систем управління повітряним рухом, виявлення та виміру параметрів об'єктів різного фізичного походження, розпізнавання, класифікації та прогнозуванню метеорологічних явищ. Складність рішення цих задач обумовлена дією різноманітних завад, захист від яких покладається на відповідні системи обробки прийнятих сигналів. До них відносяться, зокрема, системи первинної міжперіодної обробки (**МПО**), призначені для виявлення та оцінки на тлі завад параметрів корисних сигналів – носіїв інформації, що має вилучатися відповідними РЛС з відбиттів, прийнятих в результаті імпульсного зондування довкілля.

Однак самі поняття «корисного сигналу» та «завади» залежать від призначення РЛС. Так, у більшості імпульсних оглядових РЛС в ролі корисних найчастіше виступають відбиття від рухомих точкових об'єктів, які маскуються завадовими відбиттями – від місцевих предметів, штучних диполів, метеоутворень (**МУ**). В цьому випадку задача виявлення корисних сигналів на тлі завад, зокрема, від **МУ**, в процесі **МПО** вирішується тими чи іншими системами селекції рухомих цілей (**СРЦ**), перші зразки яких виникли практично одночасно з появою самих РЛС.

В той же час відбиття від **МУ** є корисними сигналами в доплерівських метеорадіолокаторах (**ДМРЛ**) (чи в метеоканалах «звичайних» РЛС). Інформація, що потрібна для класифікації та прогнозування метеоявищ, тут міститься в параметрах неперервних енергетичних спектрів (**НЕС**) міжперіодних флуктуацій цих відбиттів. Завади, що можуть істотно зменшити точність вимірювання необхідних параметрів, їм створюють відбиття як від місцевості, так і від точкових об'єктів. Параметри **МУ** на тлі цих завад визначаються в процесі **МПО** системами спектрального оцінювання (**СО**), велика кількість яких запропонована в літературі кількох останніх десятиліть.

В реальних умовах обмеженого апріорного знання та динамічній зміні за часом та простором статистичних характеристик відбиттів найважливішу роль відіграють адаптивні системи **СРЦ** та **СО**, спроможні змінювати свої параметри у відповідності із оцінками цих характеристик, отриманих по навчаючим вибіркам скінченного об'єму. В найбільш поширеному випадку гаусових відбиттів адаптація базується на використанні випадкових оцінок елементів їх кореляційної матриці (**КМ**) (частіше – матриці, оберненої до **КМ**) або тих чи інших функцій відповідних оцінок.

Отримання цих оцінок – найскладніший етап адаптації як систем **СРЦ**, так і **СО**, і може бути неприпустимим при автономній побудові кожної з них.

В той же час задачі обох систем можна вирішити простіше, оскільки в більшості випадків вони формують різні скалярні функції, але спільної для них матриці оцінок статистичних характеристик відбиттів. За рахунок цього можливе створення уніфікованих комбінованих адаптивних систем (**КАС**) **МПО**, в яких в обох адаптивних системах **МПО** використовується ця єдина матриця оцінок.

Тому є **актуальною** тема дисертаційних досліджень, направлених на розробку раціональних шляхів побудови **КАС** **МПО**, їх теоретичним та експериментальним дослідженням, обґрунтуванням рекомендацій з практичної реалізації на сучасній цифровій елементній базі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота безпосередньо пов'язана з виконанням **держбюджетних** науково-дослідних робіт (НДР) № 240 (№ Д/Р 0109u001636, 2008 р.), № 252 (№ Д/Р 0110u003509, 2010 р.), № 263 (№ Д/Р 0111u002629, 2011 р.), № 285 (№ Д/Р 0114u002699, 2014 р.); а також **договірних** НДР №3/10-2005 від 09.02.2010 (№ Д/Р 0110u001664) з ВАТ «НПО «ЛЭМЗ»; ДЗ/444-2013 від 31.10.2013 (№ Д/Р 0113u007342) з Держінформнауки; ДЗ/212-2015 від 04.12.2015 (№ Д/Р 0115u006732) з МОН України; №72К/2015 від 16.03.2015 з ДП «НДІ РС «Квант-Радіолокація», у яких здобувач був виконавцем.

**Об'єкт** досліджень – методи адаптивної **МПО** сигналів на тлі завад різноманітної природи в когерентно-імпульсних оглядових РЛС різного призначення.

**Предмет** досліджень – структури та алгоритми роботи комбінованих адаптивних систем **МПО** в когерентно-імпульсних оглядових РЛС.

**Мета** роботи – науково-технічне обґрунтування можливості, доцільності та раціональних способів практичної реалізації на сучасній цифровій елементній базі **КАС МПО** в імпульсних РЛС різного призначення.

Досягнення цієї мети забезпечено вирішенням наступних задач.

1. Розвиток теорії «узагальнених аналізаторів» **НЕС** дискретних випадкових процесів, структури яких відповідає більшості відомих класичних (непараметричних) та сучасних параметричних «невласноструктурних» методів **СО** [1–4, 6].

2. Розрахунок та порівнянням «граничних» (в гіпотетичних умовах відомої **КМ** відбиттів) та «адаптивних» (в типових умовах апріорної невизначеності) показників «**розділення-відтворення**» відомих та запропонованих алгоритмів **СО** для обґрунтування вибору доцільних для включення в **КАС МПО** [3, 4, 6, 19–23]

3. Дослідження особливостей квазіоптимальних (**КО**) компенсаційно-фільтрових систем **СРЦ** на тлі гаусових **ПЗ** в реальних умовах використання на виході компенсатору когерентних накопичувачів імпульсів прямокутної пачки корисних сигналів із «згладженими» імпульсними характеристиками (**ІХ**) [7].

4. Розрахунок та порівняння «граничних» та «адаптивних» **енергетичних й статистичних показників** виявлення пачкових когерентних сигналів на тлі пасивних завад (**ПЗ**) відомих та запропонованих алгоритмів **СРЦ** для обґрунтування вибору доцільних для включення в **КАС МПО** [8–13].

5. Обґрунтування доцільної структурно-алгоритмічної основи та схем **КАС МПО**, їх теоретичні та напівнатурні дослідження, розробка рекомендацій з практичної реалізації в сучасних та перспективних оглядових РЛС [5, 7, 14–18, 27–30].

**Методи досліджень.** Базується на вивченні літератури по темі роботи та суміжним з нею, використанні апробованих методів теорії адаптивної обробки сигналів, теорії матриць, теорії ймовірностей та математичної статистики, базуються на суворих математичних перетвореннях і фізичних трактуваннях, математичному моделюванні та поширених напівнатурних експериментах по записах сигналів діючих РЛС.

**Наукова новизна результатів роботи** полягає в наступному.

1. **Вперше** висунута ідея побудови комбінованої адаптивної системи **МПО**, в якій задачі адаптивного «**розділення-відтворення**» неперервних енергетичних спектрів міжперіодних флуктуацій радіолокаційних відбиттів та **СРЦ** на їх тлі вирішуються на спільній структурно-алгоритмічній основі адаптивних решітчастих фільтрів (**АРФ**) [5–7, 14–18, 27, 30].

2. **Розвинута** теорія «узагальнених аналізаторів» неперервних енергетичних спектрів дискретних гаусових авторегресійних (АР) випадкових процесів, яка з єдиних позицій пояснює походження та відмінності великої кількості класичних та сучасних параметричних методів СО і дозволяє запропонувати їх нові різновиди з практично корисними властивостями [1, 2, 4].

3. **Введено** додатковий критерій якості СО, що у сукупності з відомим більш повно характеризує якість «розділення-відтворення» неперервних енергетичних спектрів відбиттів. Вперше визначені кількісні можливості «розділення-відтворення» відомих та запропонованих методів СО за цими критеріями як в гіпотетичних умовах знання КМ відбиттів, так і в «адаптивній» ситуації їх заміни оцінками різного виду [3–6, 8–11].

4. **Побудована** теорія «трьох ситуацій» залежності енергетичних втрат різних систем СРЦ від доплерівського зсуву частоти корисного сигналу при використанні когерентних накопичувачів із «згладженими» імпульсними характеристиками, **розроблені** спрощені адаптивні системи СРЦ для цих умов [7].

#### **Наукове та практичне значення роботи.**

Наукове значення роботи полягає у пропозиції нового класу КАС МПО на уніфікованій основі АРФ, обґрунтуванні їх складових підсистем, методик кількісних розрахунків по різних критеріях та в різних умовах, поширених напівнатурних дослідженнях, доведенні можливостей їх практичної реалізації.

Практичне значення роботи полягає у теоретичному та експериментальному дослідженні якості «розділення-відтворення» великої кількості «класичних» та сучасних «надрозділяючих» алгоритмів СО, характеристик виявлення корисних сигналів точкових цілей на тлі ПЗ різними адаптивними системами СРЦ на основі АРФ, обґрунтуванні рекомендацій по побудові КАС МПО на їх основі, використанні головних результатів підприємствами, що розробляють радіолокаційну техніку.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертації отримані автором особисто або у співавторстві з науковим керівником та колегами із ПНДЛ радіолокаційних систем спостереження ХНУРЕ. В усіх спільних роботах автор брав безпосередню участь у постановці задач, обговоренні шляхів рішення, розробці методик та програм моделювання, обговоренні отриманих результатів, формулюванні висновків та рекомендацій, написанні та редагуванні рукописів (звітів з НДР).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наступних науково-технічних конференціях: Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, Севастополь, 2010; Microwave, Radar and Remote Sensing Symposium, Київ, 2011; IEEE CIE International Conference on Radar Ченду, Китай, 2011; International Conference on Antenna Theory and Techniques, Одеса, 2013; International Radar Symposium у містах Лейпциг, 2011, та Дрезден, Німеччина, 2013, 2015 та Гданськ, Польща, 2014; European Radar Conference, Рим, Італія, 2014; IEEE International Radar Conference, Арлінгтон, США, 2015.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 17-ти статтях, 7 з яких – в закордонних виданнях або міжнародних наукометричних базах даних та 10 – у фахових виданнях, затверджених Атестаційною колегією МОН України; 13-ти публікаціях – в матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох ро-

зділів, висновків на 162 сторінці (приблизно 240 тис. знаків), списку використаних літературних джерел зі 191 найменувань на 22 сторінках, додатків на 28 сторінках, 27 рисунків на 12 окремих сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обговорюються актуальність теми роботи, її зв'язок з програмами удосконалення радіолокаційної техніки, мета і задачі, наукова новизна та практичне значення, наводяться анотований опис змісту розділів, відомості про апробацію, публікації та втілення результатів, особистий внесок здобувача у їх отримання.

У першому розділі «Сучасні алгоритми відтворення спектрів відбиттів в імпульсних РЛС» розвивається теорія «розділення-відтворення» НЕС випадкових гаусових процесів, зокрема, відбиттів імпульсної РЛС, заданих скінченним числом  $M \gg 1$  відліків векторів комплексних амплітуд у дискретні моменти часу, розділені однаковими часовими інтервалами  $T_\ell = T_p, \ell \in 1, M-1$ .

Розглядаються «узагальнені аналізатори спектру» (УАС) двох видів (рис. 1) лінійна частина яких являє собою трансверсальні фільтри (вагові суматори) з **ІХ**  $\mathbf{w}(\varphi)$

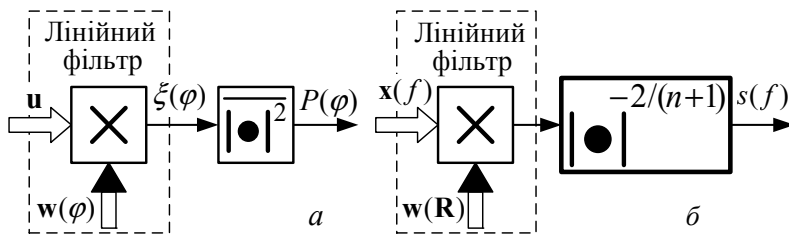


Рис. 1 – Узагальнені аналізатори спектру

та  $\mathbf{w}(\mathbf{R})$  відповідно незалежними (а) та залежними (б) від **КМ**  $\mathbf{R} = \{r_{i,j}\}_{i,j=1}^M$  відбиттів [1, 2, 4].

В першому (а) з них шуканий спектр  $s(\varphi)$  в заданому діапазоні частот  $\varphi \in \varphi_{\min}, \varphi_{\max}$

отоотожнюється з оцінкою  $\hat{P}(\varphi)$  потужності

$$P(\varphi) = \overline{|\xi(\varphi)|^2} = s_{out}(\varphi) = \mathbf{w}^*(\varphi) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{w}(\varphi), \quad \xi(\varphi) = \mathbf{w}^*(\varphi) \cdot \mathbf{u}, \quad \mathbf{w}(\varphi) = \{w_\ell(\varphi)\}_{\ell=1}^M \quad (1)$$

сигналу  $\xi(\varphi)$  на виході лінійного фільтру (ЛФ) в процесі перестроювання його **ІХ**  $\mathbf{w}(\varphi)$  по частоті  $\varphi$ . Тим самим тут він визначається розподілом потужності процесу по частоті. Його структурі відповідають відомі класичні (непараметричні) методи **СО** (періодограмні, корелограмні, їх «згладжені» різновиди тощо). Тут риска зверху та «\*» – символи статистичного усереднення та ермітового спряження.

У другому УАС (б) використовується загальновідомий зв'язок

$$s_{out}(f) = s(f) \cdot k_p(f), \quad k_p(f) = |\mathbf{x}^*(f) \cdot \mathbf{w}|^2, \quad \mathbf{x}(f) = \{e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \tau_\ell}\}_{\ell=1}^M, \quad |f| \leq 0.5 \quad (2)$$

спектрів  $s(f)$  на вході та  $s_{out}(f)$  на виході ЛФ з енергетичною частотною характеристикою (**ЕЧХ**)  $k_p(f)$  – квадратом модуля його частотної характеристики (**ЧХ**), де  $\mathbf{x}(f)$  – вектор відліків комплексної гармоніки з нормованою до частоти зондування частотою  $f$  в нормовані до інтервалу зондування моменти часу  $\tau_\ell$ .

Якщо при цьому вхідний і вихідний спектри пов'язані рівністю  $s_{out}(f) = 1/s^n(f), n \geq 0$ , то шуканий вхідний спектр  $s(f) = 1/k_p(f)^{1/n+1}$  повністю визначається **ЕЧХ**  $k_p(f)$  відповідного фільтру. Зокрема, при  $n=0, n=1$  фільтри з **ЕЧХ**

$$k_p(f) = 1/s(f) \quad (a) \quad \text{та} \quad k_p(f) = 1/s^2(f) \quad (б) \quad (3)$$

перетворюють довільний вхідний спектр  $s(f)$  в незалежний від частоти (рівномірний) спектр  $s_{out}(f)=1$  та в обернений до вхідного спектр  $s_{out}(f)=1/s(f)$ , тобто є **відбілюючими** та **обертаючими** відповідно. На їх основі можна отримати не тільки добре відомі невласноструктурні «надрозділяючі» методи **СО**, спочатку розроблені для задач квазігармонійного **СО**, а й їх модифікації [1, 2], спроможні потенційно точно **відтворити** **НЕС** гаусових процесів **авторегресії** порядку  $p < M/2$  (**АР- $p$** ), до класу яких часто можна віднести відбиті сигнали різного фізичного походження.

Показано, що ці можливості базуються на використанні особливостей рядків нижніх ( $\mathbf{H}_b$ ) та верхніх ( $\mathbf{N}_b^*$ ) трикутних стрічкових (*band*)  $M \times M$  співмножників Холецкого  $M \times M$  ермітової стрічкової матриці

$$\Psi_b = \mathbf{H}_b^* \cdot \mathbf{H}_b = \mathbf{N}_b \cdot \mathbf{N}_b^* = \mathbf{R}^{-1}, \quad (4)$$

оберненої до  $M \times M$  **КМ** процесу **АР- $p < M/2$**  (рис. 2). Вони полягають в тому, що рядки нижньої трикутної стрічкової матриці  $\mathbf{H}_b$  з шириною стрічки  $zz = p+1$  з  $(p+1)$ -го до  $M$ -го, як і рядки з першого до  $(M-p)$ -го верхньої трикутної стрічкової матриці  $\mathbf{N}_b^*$  тієї ж ширини, співпадають з **ІХ відбілюючих** фільтрів відповідного **АР-процесу**. Їх інші рядки мають сенс **ІХ «недовідбілюючих»** фільтрів, не спроможних перетворити вхідний **АР-процес** у білий шум (з рівномірним спектром). При цьому перший рядок матриці  $\mathbf{H}_b$  та останній – матриці  $\mathbf{N}_b^*$  відповідають **«всепропускним»** фільтрам, які не змінюють форму вхідного спектру.

Рядки з  $(p+1)$ -го до  $(M-p)$ -го ермітової матриці  $\Psi_b$  (4) з шириною стрічки  $z = 2 \cdot p + 1$  в цьому випадку мають сенс **ІХ обертаючих** фільтрів, інші рядки, окрім першого та останнього, співпадають з **ІХ «недообертаючих»** (**«перевідбілюючих»**) фільтрів, перший та останній рядки – з **ІХ відбілюючого** фільтру [1, 2, 4].

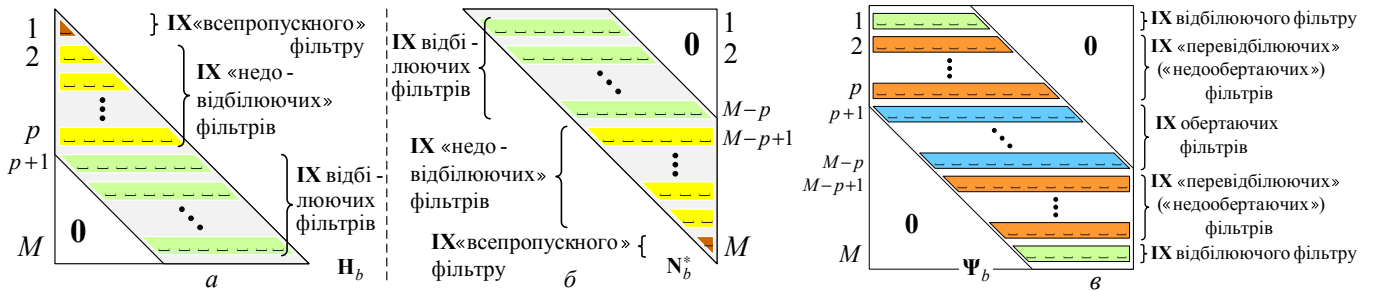


Рис. 2 – Фізичний сенс рядків матриць (4)

Використовуючи ці властивості рядків матриць в (4), далі показано, що спектральні функції (**СФ**)  $\hat{s}(f)$  більшості відомих параметричних методів **СО** являють собою ту чи іншу комбінацію квадратів модулів елементів  $M$ -вимірних векторів  $\mathbf{p}(f) = \{p_\ell(f)\}_{\ell=1}^M = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}(f)$ ,  $\mathbf{q}(f) = \{q_\ell(f)\}_{\ell=1}^M = \mathbf{N}^* \cdot \mathbf{x}(f)$ ,  $\mathbf{g}(f) = \{g_\ell(f)\}_{\ell=1}^M = \Psi \cdot \mathbf{x}(f)$  (5) – результатів перетворення вектора «пошуку»  $\mathbf{x}(f)$  в  $M$ -каналних фільтрах з трикутними нижньою ( $\mathbf{H}$ ) і верхньою ( $\mathbf{N}^*$ ) та ермітовою ( $\Psi$ ) матричними **ІХ** (**МІХ**), пов'язаних рівностями

$$\Psi = \{\psi_{i,j}\}_{i,j=1}^M = \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{N}^*, \quad (6)$$

які в умовах  $p < M/2$  переходять у (4).

Зокрема, **СФ** найбільш відомих методів «**максимальної ентропії**» (**МЕ**) Берга та «**мінімальної дисперсії**» (**МД**) Кейпона, які зазвичай записуються у вигляді

$$s_{\text{МЕ}}(f) = \psi_{MM} / |\Psi_M^* \cdot \mathbf{x}(f)|^2 = \psi_{11} / |\Psi_1^* \cdot \mathbf{x}(f)|^2, \quad s_{\text{МД}}(f) = M / \mathbf{x}^*(f) \cdot \Psi \cdot \mathbf{x}(f),$$

$\Psi_m^*$ -й рядок матриці  $\Psi$ , є комбінаціями елементів векторів (5) виду

$$s_{\text{МЕ}}(f) = 1 / |p_M(f)|^2 = 1 / |q_1(f)|^2, \quad s_{\text{МД}}(f) = M / \mathbf{p}^*(f) \cdot \mathbf{p}(f) = M / \mathbf{q}^*(f) \cdot \mathbf{q}(f). \quad (7)$$

Водночас, разом з (7) в розділі отримані комбінації елементів векторів (5), що дорівнюють **СФ** інших методів **СО**, зокрема, відомих методів «**лінійного передбачення**» (**ЛП**), «**теплого шуму**» (**ТШ**), **Борджотті-Лагунаса (БЛ)**, **модифікованого алгоритму Кейпона (МАК)** та їх різновидів, що враховують специфіку задачі **відтворення НЕС**. Проведено короткий порівняльний аналіз їх можливостей, недоліків та переваг у вирішенні цієї задачі, за результатами якого зроблено припущення про доцільність використання групи нових алгоритмів із **СФ** виду

$$s_{\text{INT}}(f, \chi) = M_e \left/ \sum_{m=\chi \cdot M}^M |p_m(f)|^2 \right. = M_e \left/ \sum_{m=\chi \cdot M}^M |q_{M+1-m}(f)|^2 \right., \quad M_e = M \cdot (1 - \chi) + 1, \quad \chi \in \frac{1}{M}, 1. \quad (8)$$

В «граничному» випадку, коли «коефіцієнт використання розміру пачки» (**кврп**)  $\chi = 1$ , ці **СФ**  $s_{\text{INT}}(f, 1) = s_{\text{МЕ}}(f)$ , тобто співпадають з **СФ** методу **МЕ**. В іншому граничному випадку ( $\chi = 1/M$ ) вони співпадають з **СФ** методу **МД** (7), тому при довільних значеннях  $\chi \in 1/M, 1$  звуться «проміжними» (*intermediate*) **МЕ-МД** алгоритмами [1, 2, 4].

Кількісному порівнянню розглянутих класичних та параметричних алгоритмів **СО** в задачах «**розділення-відтворення**» **НЕС** гаусових відбиттів в адитивній суміші із власним шумом приймача та обґрунтуванню на цій основі рекомендацій по їх вибору для **КАС МПО** присвячено наступний розділ роботи.

Другий розділ «**Граничні та реальні можливості методів відтворення спектрів відбиттів**» присвячено обґрунтуванню методу (методів) «**розділення-відтворення**» **НЕС** міжперіодних флуктуацій адитивної суміші гаусових **АР-відбиттів** та власного шуму приймача, доцільних для використання в **КАС МПО** імпульсних оглядових РЛС. Вибір базується на порівнянні показників (критеріїв) якості рішення цієї задачі розглянутими в розд. 1 методами **СО**. Використовується два інтегральні критерії (**ІК**) порівняння [3, 4, 6]

$$\varepsilon 1 = \sqrt{\int_{-0.5}^{0.5} (s(f) - \hat{s}(f))^2 / s^2(f) df} \quad (\text{а}) \quad \text{та} \quad \varepsilon 2 = \frac{\int_{-0.5}^{0.5} |s(f) - \hat{s}(f)| df}{\int_{-0.5}^{0.5} s(f) df}. \quad (\text{б}) \quad (9)$$

Перший **ІК** (**ПК**)  $\varepsilon 1$ , запропонований Б. Фрідландером та Б.А. Поратом, досить точно відбиває близькість **СФ**  $\hat{s}(f)$  обраного методу **СО** до точного спектру  $s(f)$  суміші різницею між ними на низькому рівні, але дуже слабо реагує на цю різницю на високому рівні, яка може бути практично більш важливою. У зв'язку з цим запропоновано другий **ІК** (**ДІК**)  $\varepsilon 2$ , який компенсує вказаний недолік і тому при порівнянні методів **СО** використовується разом з **ПК**.

За цими критеріями спочатку визначені та зіставлені «**граничні**» можливості **АР-параметричних** і класичних методів **СО** основі **ДПФ-фільтру** (рис. 1, а) зі «згладженою» (у загальному випадку)  $M \times M$  діагональною матрицею **D IX**



$$\mathbf{w}(f) = \mathbf{D} \cdot \mathbf{x}(f) / \sqrt{dn}, \quad \mathbf{D} = \text{diag}\{d_i\}_{i=1}^M, \quad dn = \sum_{i=1}^M d_i^2 \quad (10)$$

в гіпотетичних умовах відомої **КМ**

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_M + \eta \cdot \boldsymbol{\rho}, \quad \boldsymbol{\rho} = \{\rho_{i,j}\}_{i,j=1}^M, \quad (11)$$

що відповідає сумі власного шуму з одиничною  $M \times M$  **КМ**  $\mathbf{I}_M$  та **АР**-процесу з відносною (по відношенню до потужності шуму) потужністю  $\eta$ .

Їх залежності від розміру пачки  $M$  показані на рис. 3 для «тестових» спектрів процесів **АР-1** і **АР- $\infty$**  з коефіцієнтом кореляції  $\rho_1 = 0.99$  й інтенсивністю  $\eta = 50$  дБ. Цифрами тут позначені «проміжні» методи з різними значення **кврп**  $\chi$  (8) [3, 4, 6].

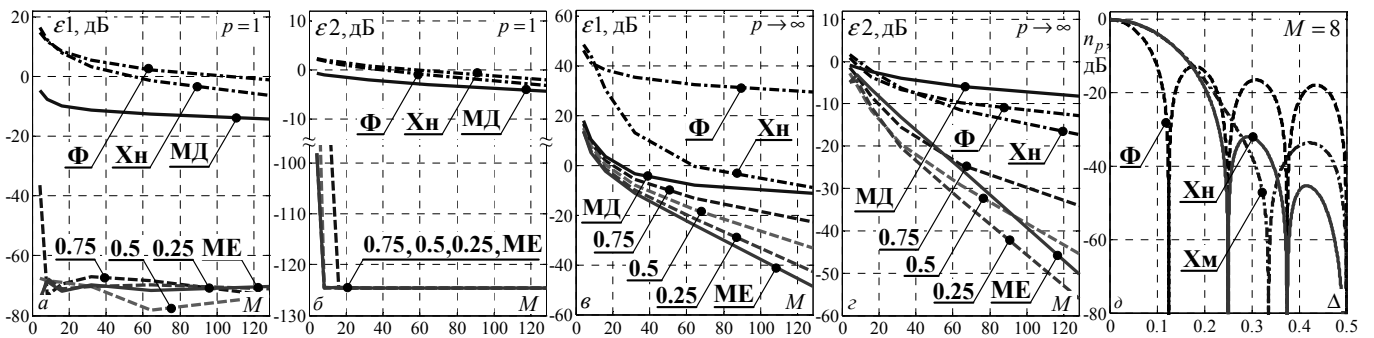


Рис. 3 – Помилки **СФ** за **ПК** (а, в) й **ДК** (б, г), та нормовані **ЕЧХ** **ДПФ**-фільтрів (д)

Великий рівень помилок по **ПК** **СФ** (1) з «незгладженою» ( $\mathbf{D} = \mathbf{I}_M$ ) **ІХ** (підписані «**Ф**») по відтворенню швидко спадаючих «хвостів» спектрів сильно корельованих **АР**-процесів високого порядку (рис. 3, в, г) обумовлений високим відносним рівнем бічних пелюсток **ЕЧХ**  $k_p(f)$  (2) **ЛФ**. Поширений спосіб їх зменшення пов'язаний, зокрема, з використанням «згладжених» **ІХ**.

На рис. 3, д показані нормовані **ЕЧХ**  $n_p(\Delta) = k_p(\Delta) / k_p(0)$ ,  $\Delta = f - \varphi$  **ЛФ** зі «згладжуючими» матрицями Ханна (підписані «**Хн**») та Хемінга («**Хм**»). Видно, що «згладжування» **ІХ**, зменшуючи рівень бічних пелюсток **ЕЧХ**, істотно зменшує й помилки відтворення по **ПК**. В той же час зростання ширини головної пелюстки **ЕЧХ** при «згладжуванні» може дещо збільшити рівень помилок по **ДК** (рис. 3, б).

Серед параметричних методів найбільшу помилку має метод **МД** Кейпона (7), але навіть він в умовах сильно корельованих **АР**-процесів високого порядку може значно перевершувати метод (1) з **ІХ** (10) по **ПК** та лише незначно поступатися йому при слабо корельованих **АР**-процесах довільного порядку. Значно більше він може поступатися методу (1) по **ДК**.

Мінімальну «граничну» помилку як по **ПК**, так і по **ДК** забезпечує алгоритм **МЕ** (7), а також «проміжні» **МЕ-МД** алгоритми (8). В умовах  $M > p$  ці помилки зумовлені власним шумом, в суміші з яким вхідний процес вже не є точним **АР**-процесом, так що вказані на рис. 2 властивості рядків матриць  $\mathbf{H}_b$  та  $\mathbf{N}_b^*$  (4) виконуються лише приблизно. Рівень цих помилок зменшується при зростанні відносної потужності  $\eta$  **АР** складової в сумі з шумом. В іншому випадку  $M \leq p$ , коли матриці  $\mathbf{H}_b$  та  $\mathbf{N}_b^*$  (6) є заповненими (не стрічковими), виникають додаткові помилки по **ПК** та **ДК**, але вони залишаються меншими у порівнянні з помилками **СФ** класич-

них та інших параметричних методів.

Алгоритми **ЛП**, **ТШ**, **БЛ**, **МАК** та їх різновиди у більшості випадків поступаються алгоритму **МЕ** та «проміжним» алгоритмам **МЕ-МД** (8) і в той же час більш складні. Тому вони виключені з подальших досліджень в реальній «адаптивній» ситуації, яким присвячена друга частина розділу.

Тут вважається, що елементи **КМ** **R** (11) апріорі невідомі і замість них використовуються ті чи інші їх оцінки або детерміновані функції цих оцінок, сформовані по доступній класифікованій навчаючій вибірці (ансамблю)

$$\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^K, \quad \overline{\mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_j^*} = \mathbf{0}_M, \quad i \neq j, \quad \mathbf{y}_i = \{y_\ell^{(i)}\}_{\ell=1}^M \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{R}), \quad i, j \in 1, K \quad (12)$$

з  $K$  взаємно некорельованих комплексних гаусових  $M$ -вимірних векторів  $\mathbf{y}_i$  з нульовими середніми значеннями та **КМ**, яка співпадає з **КМ** досліджуваного процесу.

З великої кількості в принципі можливих оцінок аналізуються відомі оцінки максимальної правдоподібності (**МП** оцінки) **КМ** загального вигляду (позначаються  $\mathbf{1}^0$ ), **МП** оцінки персиметричних **КМ** ( $\mathbf{2}^0$ ), оцінки Берга «часткових» коефіцієнтів кореляції ( $\mathbf{3}^0$ ), однозначно визначаючих безпосередньо матриці в (6) в умовах тьопліцевої **КМ**, оцінки стрічкових (4) апроксимацій цих матриць із керованою шириною стрічки для довільних **КМ** ( $\mathbf{4}^0$ ), оцінки таких же апроксимацій цих матриць у випадку тьопліцевої **КМ** ( $\mathbf{5}^0$ ) [8, 10, 11, 19].

Перехід до кожної наступної оцінки більш повно враховує апріорну інформацію про специфіку структури (тьопліцевість) істинної **КМ**, обумовлену припущенням азимутальної стаціонарності відбиттів та постійністю інтервалів зондування.

В «адаптивній» ситуації використання випадкових оцінок невідомих параметрів якості **вiдтворення** спектрів характеризують середні значення  $\overline{\varepsilon}_1$  та  $\overline{\varepsilon}_2$  випадкових в цих умовах **ПК** та **ДК**. Доведено, що у певних випадках, можливих для деяких **СФ** та наведених оцінок, значення  $\overline{\varepsilon}_1$  та  $\overline{\varepsilon}_2$  складаються з їх «граничних» значень та додаткових помилок, зумовлених можливим зсувом  $\nu = 1 - \overline{\delta}(f)$  та ненульовою при кінцевих обсягах вибірки  $K$  дисперсією  $\sigma_\delta^2$  оціночної нормованої **СФ** (**НСФ**)

$$\overline{\delta}(f) = \widehat{s}(f) / s_\infty(f), \quad \widehat{s}(f) = s(f, \widehat{\mathbf{R}}), \quad s_\infty(f) = s(f, \mathbf{R}). \quad (13)$$

Тому навіть метод з нульовою «граничною» помилкою, для якого «гранична» **СФ**  $s_\infty(f)$  співпадає з точним спектром  $s(f)$  ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ ) має середні помилки

$$\overline{\varepsilon}_1 = \overline{\varepsilon}_2 = \sqrt{\nu^2 + \sigma_\delta^2} \approx \begin{cases} \sigma_\delta, & \sigma_\delta^2 \gg \nu^2, \quad (a) \\ \nu, & \nu^2 \gg \sigma_\delta^2, \quad (б) \end{cases} \quad (14)$$

і може поступатися методу з більшими помилками ( $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$ ), але з меншою «нижньою границею середніх помилок» (**НГСП**) (14), залежної від виду **СФ**, оцінок **КМ** та об'єму  $K$  навчаючої вибірки  $\mathbf{Y}$  (12). У зв'язку з цим збільшення розміру  $M$  пачки, що аналізується, зменшуючи «граничні» помилки (рис. 3,  $a - c$ ) в цих умовах може не дати ефекту, якщо не буде одночасно супроводжуватися зменшенням зміщення та дисперсії відповідної випадкової **СФ** за рахунок, зокрема, покращення оцінок **КМ** або збільшення обсягу вибірки.

Подальші теоретичні дослідження та математичне моделювання повністю підтвердили ці властивості розглянутих методів **СО** та дозволили обґрунтувати вибір

доцільного для використання в складі **КАС МПО**. Отримані при цьому головні результати полягають у наступному.

1. Переваги «надрозділяючих» параметричних методів «розділення-відтворення» **НЕС** у порівнянні з класичними методами на основі перетворення Фур'є в гіпотетичній ситуації відомої **КМ** не гарантують їх переваг і в реальній «адаптивній» ситуації заміни апріорі невідомих параметрів, що визначають **КМ** або обернену до неї матрицю, тими чи іншими їх оцінками, що формуються по вибірках неминуче скінченного об'єму. Практично важливі в цих умовах «швидкодіючі» параметричні методи **СО**, для яких потрібний мінімальний обсяг вибірки.

2. Для класичних Фур'є-спектрів (1) з **ІХ** (10) випадкові **НСФ**  $\hat{\delta}(f)$  (13) на основі оцінок  $\mathbf{1}^0$  та  $\mathbf{2}^0$  однакові. Тому вони мають однакові закони розподілу (Ерланга) з нульовим зміщенням та дисперсією, яка не залежить від розміру пачки  $M$  та обернено пропорційна обсягу вибірки  $K$ , і тому еквівалентні по **ПК** та **ДК**.

3. Такі ж статистичні властивості мають **НСФ** (13) «згладжених» Фур'є-спектрів (1), (10) ( $\mathbf{D} \neq \mathbf{I}_M$ ). Тому в «адаптивній» ситуації різниця по **ПК** та **ДК** між ними та «незгладженими» Фур'є-спектрами може бути істотно менше «граничної» різниці, а «згладжування» – втрачати сенс.

4. Параметричні методи, **СФ**  $s(f, \hat{\Psi})$  яких визначаються випадковою матрицею  $\hat{\Psi}$ , якою апроксимується матриця, обернена до **КМ**, мають інші статистичні властивості. Так, випадкова **НСФ** (13) методу **МД** Кейпона в традиційній формі (7) має ненульове зміщення, обернено пропорційне відносному обсягу вибірки  $K_r = K/M$ , використовуючи як оцінку  $\mathbf{1}^0$ , так і  $\mathbf{2}^0$ . В останньому випадку це зміщення вдвічі менше при приблизно тій же дисперсії. Внаслідок зміщення для реалізації «граничних» переваг методу **МД** у порівнянні з класичними методами можуть бути потрібні вибірки такого об'єму, який може бути практично недосяжним.

5. Запропоновано модифікований метод **МД** (**ММД**) з нульовим зміщенням, але з підвищеною дисперсією його **НСФ** (13). Показано, що негативний ефект зростання дисперсії значно менше позитивного ефекту від зменшення зміщення, що істотно підвищує швидкодію – середні помилки по **ДК** практично досягають своїх «граничних» значень вже при відносному обсязі вибірки  $K_r = 1,5$ .

6. Досліджена ефективність методу **МЕ** Берга з мінімальними «граничними» помилками. Показано, що в «адаптивній» ситуації вони, навпаки, можуть бути значно більші за помилки інших методів, зокрема, **МД** і **ММД**. Причина цього полягає в тому, що **СФ** (7) методу **МЕ** побудована з квадрату модуля одного елемента випадкових  $M$ -вимірних векторів  $\mathbf{p}(f)$  або  $\mathbf{q}(f)$  (5), тоді як в **СФ** **МД** та **ММД** виконується усереднення квадратів модулів всіх  $M$  елементів цих векторів. Саме у зв'язку з цим є доцільним перехід до «проміжних» **МЕ-МД** **СФ** (8) з регульованими значеннями **кврп**  $\chi$ . Шляхом математичного моделювання підтверджені їх переваги у швидкодії в порівнянні з розглянутими іншими параметричними методами.

7. Показано, що подальше підвищення швидкодії забезпечує коректне урахування достовірної апріорної інформації, яка зменшує розмірність вектору параметрів, який оцінюється на етапі адаптації.

Проаналізовані резерви підвищення швидкодії, пов'язані з урахуванням мож-

ливої тьопліцевості **КМ** відбиттів в РЛС з постійним інтервалом зондування; із «стрічковою» апроксимацією трикутних співмножників Холецького матриці, оберненої до **КМ**, в РЛС з довільними інтервалами зондування; з сумісним використанням обох цих резервів у відповідних умовах.

8. Показано, що урахування тьопліцевості **КМ** за рахунок використання оцінок  $\mathbf{3}^0$  істотно зменшує зміщення **НСФ** (13) **МД**-спектрів у порівнянні як з оцінкою  $\mathbf{1}^0$ , що не враховує цю специфіку **КМ**, так і  $\mathbf{2}^0$ , що враховує її лише частково. В тестових прикладах використання оцінок  $\mathbf{3}^0$  приблизно в 2–4 рази підвищило швидкодію – однакові помилки по **ДК** **МД**-спектрів забезпечувались вибірками приблизно в 2–4 рази меншого об'єму, ніж на основі оцінок  $\mathbf{2}^0$ .

Показано, що «стрічкова» апроксимація оцінок трикутних співмножників оберненої матриці за рахунок оцінок  $\mathbf{4}^0$ , припустима при довільних законах зондування РЛС, також підвищує швидкодію, особливо помітно – «проміжних» **МЕ-МД** **СФ** (8). Якщо при цьому використовується зондування з постійним часовим інтервалом, то перехід до оцінок  $\mathbf{5}^0$  додатково підвищує швидкодію цих **СФ**, яка може стати істотно вищою, ніж класичних методів **СО**.

9. Проведені дослідження в цілому дозволили зробити висновок, що серед розглянутої досить великої кількості методів «розділення-відтворення» **НЕС** для використання у складі **КАС** **МПО** найбільш доцільні саме запропоновані «проміжні» **МЕ-МД** методи з **СФ** (8) з регульованими значеннями **кврп**  $\chi$ .

**Третій розділ «Квазіоптимальні системи МПО сигналів на тлі пасивних завад»** присвячений обґрунтуванню доцільних для використання в **КАС** **МПО** імпульсних оглядових РЛС методів **СРЦ** на тлі адитивної суміші власного шуму та **ПЗ**. Головна увага приділена ефектам, пов'язаним зі «згладжуванням» **ІХ** когерентних накопичувачів імпульсів пачки на виході фільтру компенсації **ПЗ** в компенсаційно-фільтрових системах **СРЦ**. Воно широко застосовується на практиці, оскільки покращує розділення в імпульсному об'ємі РЛС цілей з різними ефективними поверхнями розсіяння та радіальними швидкостями. Воно є також необхідним для рішення задач швидкісної селекції цілей в широкому класі фільтрових систем **СРЦ**.

Однак таке згладжування розузгоджує прийнятий та опорний сигнали, так що обробка в цілому стає неоптимальною (квазіоптимальною (**КО**)) навіть за оптимальних структури та параметрах фільтру компенсації завад, а пов'язані з цим втрати – неприпустимо великими. У цих умовах можливі інші **КО** системи **СРЦ** з меншим рівнем втрат, що до того ж можуть бути і більш простими. Їх пошуку присвячені дослідження розділу, які проводяться за наступних умов та припущеннях.

Вважається, що на вході системи **СРЦ** в кожному елементі розділення за дальністю спостерігається  $M$ -вимірний гаусів комплексний вектор (пачка)

$$\mathbf{u} = \{u_\ell\}_{\ell=1}^M = \mathbf{y} + \gamma \cdot \mathbf{s} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{R}_u), \quad \mathbf{y} = \{y_\ell\}_{\ell=1}^M \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{R}), \quad \gamma = 0, 1 \quad (15)$$

адитивної суміші завади  $\mathbf{y}$  і, можливо (при  $\gamma = 1$ ), когерентного (гаусового) сигналу

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}(f_S) = \{s_\ell(f_S)\}_{\ell=1}^M = \zeta_S \cdot \mathbf{x}(f_S) \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{R}_s), \quad f_S \in -0.5, 0.5, \quad \zeta_S \sim CN(0, \eta_S) \quad (16)$$

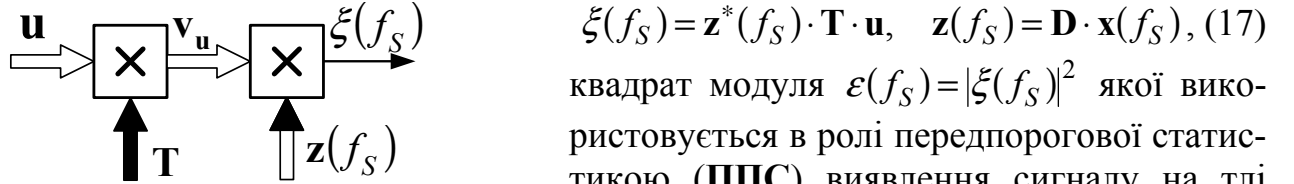
з нульовими векторами середніх значень та **КМ**  $\mathbf{R}$  і  $\mathbf{R}_s$  відповідно.

Під завадою тут розуміється власний шуму приймача у суміші з відбиттями від протяжних джерел різного фізичного походження (місцеві предмети, **МУ**, діполі

тощо), які вважаються гаусовими **АР**-процесами цілого порядку  $p \geq 1$ . Корисними тут є відбиття з відносною (по відношенню до шуму) інтенсивністю  $\eta_S$  від точкової цілі, що рухається з довільною радіальною швидкістю. При кількісних розрахунках для простоти без втрати загальності вважається, що використовується постійна частота зондування, у зв'язку з чим нормований до неї доплерівський зсув частоти корисного сигналу, який відраховується від доплерівського зсуву завади, прийнятого за нуль, лежить в діапазоні  $f_S \in -0.5, 0.5$ .

Узагальнена схема всіх систем **СРЦ**, що розглядаються, показана на рис. 4.

Тут формується скалярна функція (білінійна форма)



квадрат модуля  $\varepsilon(f_S) = |\xi(f_S)|^2$  якої використовується в ролі передпорогової статистики (**ППС**) виявлення сигналу на тлі

Рис. 4 – Узагальнена схема систем **СРЦ** **ПЗ**. В залежності від параметрів **МІХ**

$\mathbf{T} = \{t_{ij}\}_{i,j=1}^M$  компенсатора **ПЗ** та «згладжуючої» матриці  $\mathbf{D} = \text{diag}\{d_i\}_{i=1}^M$  когерентного накопичувача з **ІХ**  $\mathbf{z}(f_S)$  схема рис. 4 реалізує як добре відому в умовах (15), (16) оптимальну обробку, так і велику кількість її **КО** різновидів. Оптимальній обробці прямокутної пачки корисного сигналу відповідає вибір параметрів

$$\mathbf{T} = \mathbf{\Psi} = \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{N}^*, \quad \mathbf{D} = \mathbf{I}_M, \quad \xi(f_S) = \mathbf{x}^*(f_S) \cdot \mathbf{\Psi} \cdot \mathbf{u}. \quad (18)$$

Параметри використаних для порівняння **КО** схем **СРЦ** наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Номер	1	2	3	4	5
<b>МІХ</b> компенсатору <b>ПЗ</b>	$\mathbf{T} = \mathbf{\Psi} = \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{H}$	$\mathbf{T} = \mathbf{\Psi}_b = \mathbf{H}_b^* \cdot \mathbf{H}_b$	$\mathbf{T} = \mathbf{H}$	$\mathbf{T} = \mathbf{H}_b$	$\mathbf{T} = \mathbf{I}_M$

В першій з них функцію компенсатора **ПЗ** виконує  $M$ -вимірний фільтр, що перетворює вхідний вектор **ПЗ** у (15) у вихідний вектор  $\mathbf{v} = \mathbf{\Psi} \cdot \mathbf{u} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{\Psi})$  з **КМ**  $\mathbf{R}_v = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^* = \mathbf{\Psi} = \mathbf{R}^{-1}$  і тому далі зветься обертаючим фільтром (**КМ**  $\mathbf{R}$  вхідного процесу). Фільтр із стрічковою **МІХ** в другій схемі зветься **квазіобертаючим**. При визначених в розд. 1 умовах ця **МІХ** та її трикутні стрічкові співмножники Холецького співпадають з матрицями рис. 2. Фільтр в третій схемі перетворює вхідний вектор **ПЗ** у (15) у вихідний вектор  $\mathbf{v} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{u} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$  з **КМ**  $\mathbf{R}_v = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^* = \mathbf{I}_M$  і тому зветься **відбілюючим** фільтром (**КМ**  $\mathbf{R}$  вхідного процесу). По аналогії фільтр четвертої схеми зветься **квазівідбілюючим**. Останній фільтр є «**всепропускним**».

Виходи кожного з цих фільтрів об'єднуються в когерентних накопичувачах, в загальному випадку із «згладжуючою» матрицею  $\mathbf{D} \neq \mathbf{I}_M$ .

Наведені в таблиці схеми порівнюються по значенню втрат

$$\mu(f_S) = \mathbf{x}^*(f_S) \cdot \mathbf{\Psi} \cdot \mathbf{x}(f_S) \cdot \frac{\mathbf{w}^*(f_S) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{w}(f_S)}{|\mathbf{w}^*(f_S) \cdot \mathbf{x}(f_S)|^2} \geq 1, \quad \mathbf{w}(f_S) = \mathbf{T}^* \cdot \mathbf{z}(f_S) \quad (19)$$

у відношенні сигнал / (завада+шум) (**ВСЗШ**) у порівнянні з його максимальним значенням (першим співмножником), що забезпечується оптимальною обробкою (18).

На рис. 5, 6 наведені типові приклади втрат (19) схем 1 та 3 в умовах унімодальних **АР ПЗ** з відносною інтенсивністю  $\eta = 10^5$  (50 дБ) порядків  $p = 3, 10$  з коефіцієнтами міжперіодної кореляції  $\rho = 0,96, 0,99$ . Суцільні криві тут відповідають згладжуючій матриці Ханна, штрих-пунктирні – Хеммінга, штрихові на рис. 6 – відсутності згладжування ( $\mathbf{D} = \mathbf{I}_M$ ).

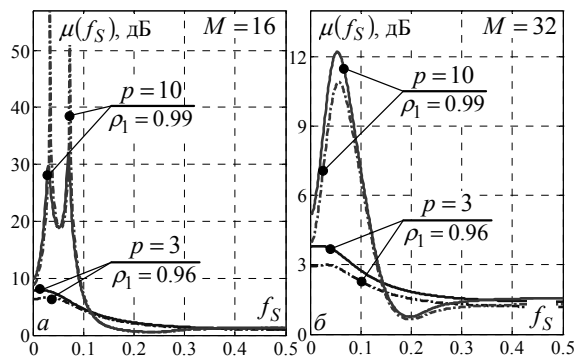


Рис. 5 – Енергетичні втрати схеми 1

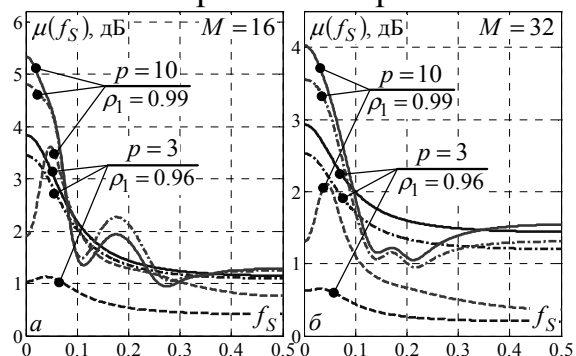


Рис. 6 – Енергетичні втрати схеми 3

на рис. 5. Видно, що в умовах сильнокорельованих **АР ПЗ** високого порядку  $p \geq 10$  (рис. 7, б) виграш може складати десятки децибел і тим більше, чим менше розмір пачки, що обробляється. В цих умовах він може бути ще більшим при більш високій відносній інтенсивності завад  $\eta > 50$  дБ, що досить часто буває в реальних умовах. Така можливість доведена аналітично, використовуючи відомі нерівності Канторовича, підтверджена фізичними міркуваннями та результатами розрахунків.

Як видно з рис. 5 – 7, енергетичні втрати **КО** схем 1 – 5 істотно залежать від частоти настроювання когерентного накопичувача (яка вважається співпадаючою з відносною доплерівською частотою очікуваного корисного сигналу). Розроблена

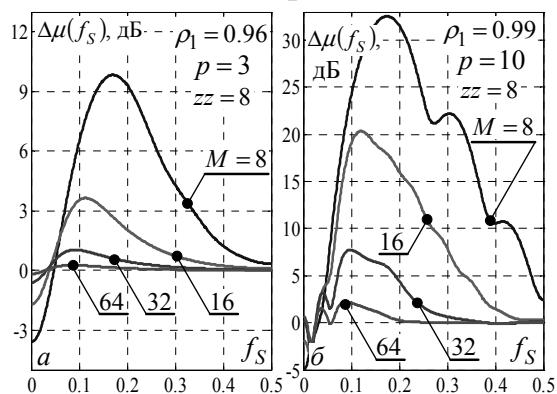


Рис. 7 – Енергетичний виграш схеми 4 у порівнянні зі схемою 5

З порівняння відповідних кривих видно, що втрати більш простої схеми 3 можуть бути значно менші, ніж схеми 1, особливо в умовах сильнокорельованих **АР ПЗ** високого порядку  $p \geq 10$  та відносно малих розмірів пачки ( $M \leq 16$ ), які досить характерні для практики. Близькі до схеми 3 можуть бути і втрати ще більш простої схеми 4 на основі **квазівідбілюючого** фільтру (із трикутною стрічковою **МІХ**) навіть за ширини стрічки  $zz < p$ . Однак подальше спрощення обробки за рахунок відмови від фільтру компенсації **ПЗ** (схема 5) і покладання функцій **СРЦ** тільки на **квазіузгоджений** фільтр з **ІХ**  $z(f_s)$  (17) може істотно збільшити втрати, що наочно й ілюструється рис. 7. Тут наведений енергетичний виграш  $\Delta\mu(f_s) = \mu_5(f_s)/\mu_4(f_s)$  схеми 4 у порівнянні із схемою 5 при тих же вхідних впливах, що і

теорія «**трьох ситуацій**», яка дозволила дати наочне фізичне трактування відповідних залежностей, використаних для подальших практичних рекомендацій [7].

Результати розділу в цілому дозволили обґрунтувати доцільність використання в **КАС МПО** імпульсних оглядових РЛС адаптивних аналогів схеми 4 на основі квазівідбілюючого фільтру компенсації **ПЗ** з трикутною стрічковою **МІХ** з керованою шириною стрічки [8–12].

Четвертий розділ «Комбіновані системи МПО на основі адаптивних решітчастих фільтрів» присвячений розробці та напівнатурним дослідженням КАС МПО, в якій на єдиній структурно-алгоритмічній основі вирішуються задачі «розділення-відтворення» НЕС міжперіодних флуктуацій відбиттів та СРЦ на їх тлі. Перша з них передбачає формування СФ

$$\hat{s}_{\text{INT}}(f) = M_e / \sum_{m=\chi \cdot M}^M |p_m(f)|^2, \quad M_e = M \cdot (1 - \chi) + 1, \quad \chi \in 1/M, 1, \quad \mathbf{p}(f) = \{p_m(f)\}_{m=1}^M = \hat{\mathbf{H}}_b \cdot \mathbf{x}(f), \quad (20)$$

«проміжних» методів СО, друга – порогову обробку ППС схеми 4

$$\hat{\varepsilon}_{QW}(f_S) = |\mathbf{z}^*(f_S) \cdot \hat{\mathbf{H}}_b \cdot \mathbf{u}|^2 = |\mathbf{z}^*(f_S) \cdot \mathbf{v}_u|^2, \quad \mathbf{v}_u = \hat{\mathbf{H}}_b \cdot \mathbf{u} \quad (21)$$

на основі спільного квазівідбілюючого (*quasi-whitening*) фільтру зі стрічковою трикутною МІХ  $\hat{\mathbf{H}}_b$  з керованою шириною  $zz$  стрічки.

Проведено порівняльний аналіз фільтрів з відповідними МІХ. Показані переваги використання з цією метою адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ) [5, 14, 15, 17], пов'язані з однорідністю структури утворюючих їх «елементарних решітчастих фільтрів» (ЕРФ), простотою та ефективністю урахування можливої апіорної інформації про специфіку структури апіорі невідомої КМ, простотою керування шириною стрічки трикутної МІХ (вибором кількості ступіней).

На рис. 8 показана схема пропонованої КАС МПО на основі «последовного» АРФ, а на рис. 9 – зразки її практичної реалізації на сучасній цифровій елементній базі, створені за участю автора [27, 29]. В першому з них для адаптації використовуються оцінки  $3^0$ ,  $5^0$  Берга [15], що дозволяють ефективно врахувати очікувану тьопліцевість КМ, в другому – рекурентний алгоритм «К-рангової модифікації параметрів АРФ» [16, 18], найбільш придатний в умовах КМ загального вигляду.

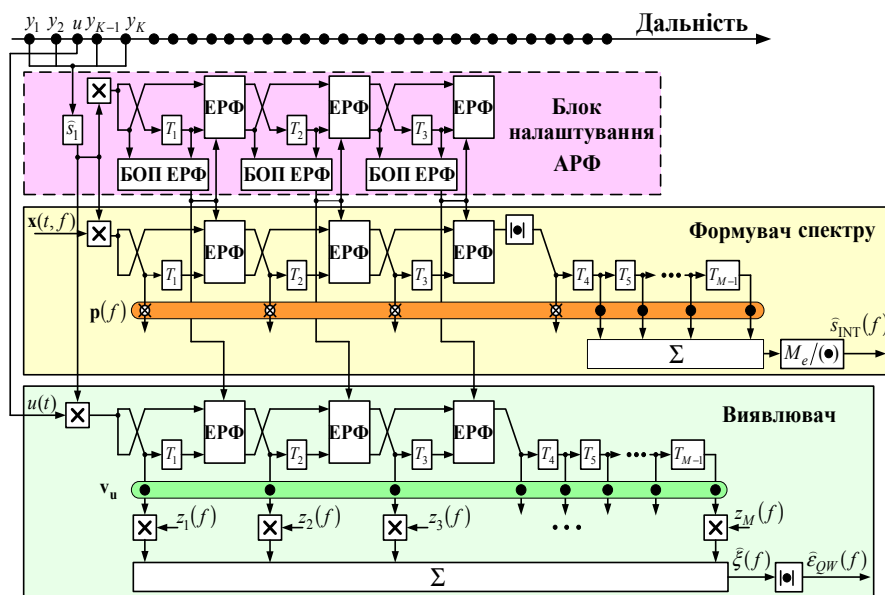
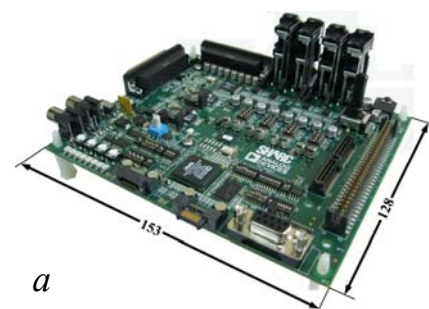


Рис. 8 – КАС МПО на основі «последовного» АРФ



а



б

Рис. 9 – Налагоджувальні плати ЦСП ADSP-21469 (а) й TMS320C6678 (б)

Статистики (20) и (21) тут формуються в три етапи.

На першому етапі в блоці налаштування АРФ по навчаючій вибірці (12) оцінюються параметри ЕРФ, сукупність яких в факторизованій формі визначає потрібну МІХ АРФ в цілому. Вони передаються у відповідні ЕРФ «формувача спектру»

та «виявлювача», які відрізняються тільки своїми вхідними сигналами. На **другому** етапі в **АРФ** формувача спектру вектори «пошуку»  $x(f)$  перетворюються у вектори  $p(f)$  (5), а вектор  $u$  в **АРФ** виявлювача – у вектор  $v_u$  (21). На **третьому** етапі формується сума квадратів модулів  $M_e \in 1, M$  останніх компонент вектора  $p(f)$ . При  $M_e = 1$  вона є **СФ** методу **МЕ**, при  $M_e = M$  – **СФ** методу **МД**, а при  $1 < M_e < M$  – рекомендованого «проміжного» методу **МЕ-МД** з обраним коефіцієнтом використання розміру пачки  $\chi$ .

Елементи вектору  $v_u$  на виході «виявлювача» когерентно накопичується з вагами – компонентами вектору  $z(f)$ . Квадрат модуля (21) накопиченої суми надалі порівнюється з порогом для прийняття рішення про наявність або відсутність цілі в елементі дальності, що перевіряється.

Проведено напівнатурні дослідження **КАС МПО** рис. 8, 9 по записах відбиттів діючої імпульсної РЛС 3-см діапазону з постійним інтервалом зондування та фільтровою системою **СРЦ** (схема 5) на основі квазіузгодженого фільтру Ханна.

Деякі з отриманих результатів наведені на рис. 10, 11.

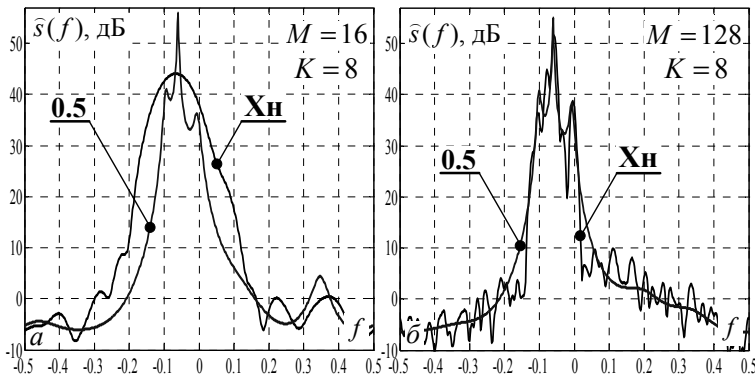


Рис. 10 – Згладжені вікном Ханна Фур'є-спектри та запропоновані «проміжні» **МЕ-МД**-спектри

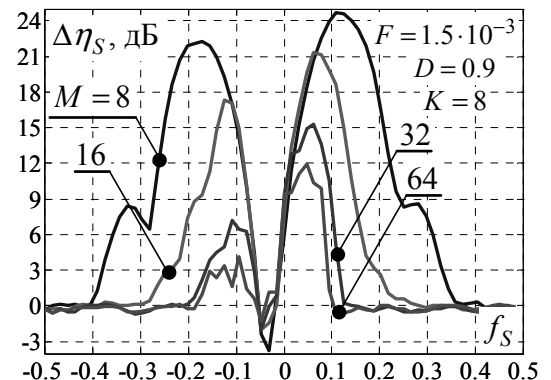


Рис. 11 – Виграш запропонованої схеми 4 в порівнянні із схемою 5

На першому з них наведені результати порівняння згладженого вікном Ханна Фур'є спектру (1) з **ІХ** (10) з **МЕ-МД** спектром з **кврп**  $\chi = 0,5$  та використанні оцінок  $5^0$  параметрів **АРФ**, отриманих по навчаючій вибірці об'єму  $K = 8$ . Видно, що для наближення до спектру «проміжного» **МЕ-МД** методу, отриманого вже при розмірі пачки  $M = 16$ , Фур'є-спектру потрібна пачка  $M = 128$ , а саме наближення супроводжується небажаними флуктуаціями **СФ**, що не мають фізичного підґрунтя і відсутні в **МЕ-МД** спектрах.

На рис. 11 показані результати порівняння в напівнатурному експерименті порогових сигналів, що забезпечують задані ймовірності правильного виявлення  $D$  та хибної тривоги  $F$ , запропонованої адаптивної **СРЦ** на основі **АРФ** (схема 4) та штатної схеми 5. Отримані великі виграші забезпечили в експерименті практично «безпровальну» проводку змодельованої цілі, що рухалась зі змінною радіальною швидкістю, тоді як коефіцієнт її проводки штатною системою **СРЦ** був неприпустимо малим (не більше 0,1). Це з великою ступінню точності відповідає висновкам теорії «**трьох ситуацій**» (розд. 3, рис. 7), і одночасно свідчить про справедливість моделей зовнішніх впливів, які припускались при теоретичному аналізі, зокрема, гаусової моделі відбиттів у сукупності з їх **АР**-представленням, можливість викорис-



тання припущень не тільки про «персиметрію», але й про «тьопліцевість» відповідних **КМ**, високу ефективність її урахування в **АРФ**. Практично найбільш важливим наслідком спільних експериментів є рішення їх Замовника перейти від штатної системи **СРЦ** до запропонованої схеми 4 на основі **АРФ**.

Декілька наведених в кінці розділу додаткових напівнатурних експериментів по записах сигналів РЛС інших діапазонів та з вобуляцією інтервалів зондування різного виду також підтвердили доцільність переходу в них від штатної до адаптивної **СРЦ** на основі **АРФ** з *K*-ранговою модифікацією його параметрів [16, 18].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна задача удосконалення адаптивних систем міжперіодної обробки (**МПО**) сигналів імпульсних оглядових РЛС різного призначення шляхом реалізації комбінованої адаптивної системи (**КАС**) **МПО** на основі адаптивних решітчастих фільтрів (**АРФ**), що вирішує у комплексі актуальні задачі відтворення неперервних енергетичних спектрів (**НЕС**) радіолокаційних відбиттів різної фізичної природи та селекції рухомих цілей (**СРЦ**) на їх тлі. В реальній «адаптивній» ситуації апріорної невизначеності по використаним критеріям запропонована **КАС** **МПО** на 3–7 дБ краще за класичні «згладжені» Фур'є-спектри відтворює **НЕС** відбиттів, а виграв у **пороговому** сигналі у порівнянні із широко розповсюдженими фільтровими системами **СРЦ** може досягати 10 – 20 дБ і більше.

Найбільш важливі наукові та практичні результати роботи є такими:

1. Розвинута теорія «узагальнених аналізаторів» **НЕС** випадкових процесів різного фізичного походження, в структуру яких укладаються відомі класичні та «невласноструктурні» параметричні методи спектрального оцінювання (**СО**), яка дозволяє запропонувати їх нові різновиди з практично корисними властивостями.

2. Запропонований критерій якості оцінювання **НЕС** відбиттів, що у сукупності з відомим більш повно характеризує ефективність вирішення задачі «розділення-відтворення» **НЕС**, ніж кожен з них окремо.

3. За цими критеріями в гіпотетичних умовах відсутності апріорної невизначеності зіставлені відомі та нові методи **СО**. Показано, що запропоновані параметричні «проміжні» методи в 2,5–4 рази кращі за класичний «згладжений» метод Фур'є.

4. Досліджена якість відтворення **НЕС** у реальній ситуації апріорної невизначеності статистичних характеристик відбиттів. Показана доцільність втілення в **КАС** **МПО** запропонованих «проміжних» методів **СО** на основі фільтрів з трикутною стрічковою матричною імпульсною характеристикою (**МІХ**), параметри якої оцінюються алгоритмами, що враховують специфіку закону зондування РЛС.

5. Проаналізовані компенсаційно-фільтрові системи **СРЦ** з поширеним на практиці «згладжуванням» **ІХ** когерентних накопичувачів імпульсів пачки на виході фільтру компенсації завад. Показано, що в цих умовах можливі нові схеми обробки на основі квазівідбілюючого фільтру з нижньою трикутною стрічковою **МІХ** з підвищеною у порівнянні з відомими ефективністю і в той же час більш прості.

6. Розроблена теорія «трьох ситуацій», що пояснює залежність втрат всіх розглянутих схем **СРЦ** від доплерівського зсуву частоти корисного сигналу відносно доплерівської частоти спектру пасивної завади (**ПЗ**).

7. Оцінена швидкодія адаптивного варіанту рекомендованої структури **СРЦ**, в

якій **МІХ** фільтру компенсації **ПЗ** оцінюється за навчаючою вибіркою скінченного об'єму. Показано, що відповідні системи мають рекордну швидкодію, і тому рекомендуються для втілення в **КАС МПО** імпульсних РЛС.

8. Порівняні можливі структури квазівідбілюючих фільтрів з трикутною стрічковою **МІХ** і обґрунтована доцільність використання в їх ролі **АРФ**. Розроблені **КАС МПО** на основі єдиного **АРФ**, подана трьохетапна процедура раціонального вирішення в них обох задач **МПО**, практично реалізовані на сучасній елементній базі зразки відповідних **КАС МПО**.

9. Проведені напівнатурні дослідження **КАС МПО** підтвердили теоретично обґрунтовані можливість, високу ефективність, та доцільність втілення запропонованих технічних рішень в існуючі та перспективні імпульсні оглядові РЛС.

В цілому наведені результати дозволяють вважати досягнутою мету роботи, що має важливе теоретичне та практичне значення для удосконалення вітчизняної радіолокаційної техніки різного призначення.

### ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Леховицкий Д.И. Параметрические методы оценивания спектров отражений от метеообразований / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, Д.В. Атаманский // Системи обробки інформації. — 2011. — Т. 5(95). — С. 67–78.

2. Lekhovytskiy D.I. Estimation of the Energy Spectrums of Reflections in Pulse Doppler Weather Radars. Part 1. Modifications of the Spectral Estimation Algorithms / D.I. Lekhovytskiy, D.V. Atamanskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka // Radioelectronics and Communications Systems. — 2015. — Vol. 58, №12. — P. 523–550.

3. Lekhovytskiy D.I. Estimation of the energy spectrums of reflections in pulse Doppler weather radars. Part 2. Extreme performance / D.I. Lekhovytskiy, D.V. Atamanskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka // Radioelectronics and Communications Systems. — 2016. — Vol. 59, No. 9. — P. 379–396.

4. Rachkov D.S. Estimation of continuous energy spectra of random echoes in coherent pulse radar / D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka, D.I. Lekhovytskiy, D.V. Atamanskiy // International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT-2013: int. conf., 16–20 September 2013: proc. — Odessa, Ukraine, 2013. — P. 319–322.

5. Rachkov D.S. Lattice implementation of «superresolving» methods for meteorological objects spectra estimation / D.S. Rachkov, D.I. Lekhovytskiy, A.V. Semeniaka, B.M. Vovshin, U.U. Laurukevich // International Radar Symposium IRS-2014: int. conf., 16–18 June 2014, Gdansk, Poland: proc. — Gdansk, 2014. — P.35–38.

6. Rachkov D.S. Estimation of meteorological objects energy spectra in pulse Doppler weather radar / D.S. Rachkov, D.I. Lekhovytskiy, A.V. Semeniaka [et al.] // International Radar Symposium IRS-2013: int. conf., 18–21 June 2013, Dresden, Germany: proc. — Dresden, 2013. — Vol. 2. — P. 811–817.

7. Lekhovytskiy D.I. Quasioptimal algorithms for batch coherent signals interperiod processing against background clutter / D.I. Lekhovytskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka, D.V. Atamanskiy, V.P. Riabukha // International Radar Symposium IRS-2014: int. conf., 16–18 June 2014, Gdansk, Poland: proc. — Gdansk, 2014. — P. 25–30.

8. Semeniaka A.V. Band-diagonal regularization of estimates of Gaussian interference covariance matrices with various structure specific / A.V. Semeniaka, D.I. Lekhovytskiy

skiy, D.S. Rachkov // Radar Science and Technology.— 2012.—V.10, №4.— P. 352–362.

9. Леховицкий Д.И. Ленточно-диагональная регуляризация МП оценок корреляционных матриц в задачах адаптивной обработки сигналов на фоне гауссовых помех / Д.И. Леховицкий, Ю.И. Абрамович, В.П. Рябуха, Г.А. Жуга, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 419–422.

10. Семеняка А.В. О методах оценивания теплицевых корреляционных матриц в задачах адаптивной пространственно-временной обработки сигналов / А.В. Семеняка, Д.С. Рачков, Д.И. Леховицкий // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 441–447.

11. Semeniaka A.V. Comparative Analysis of Toeplitz Covariance Matrix Estimation Methods for Space-Time Adaptive Signal Processing / A.V. Semeniaka, D.I. Lekhovitskiy, D.S. Rachkov // IEEE CIE International Conference on Radar RADAR-2011: int. conf., 24–27 October 2011, Chengdu, China: proc. — Chengdu, 2011. — P. 696–699.

12. Леховицкий Д.И. СДЦ в импульсных РЛС: 5. Адаптивные системы между-периодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д.И. Леховицкий, В.П. Рябуха, Г.А. Жуга, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 508–525.

13. Леховицкий Д.И. СДЦ в импульсных РЛС: 3. Об управлении уровнем вероятности ложной тревоги в фильтровых системах междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Леховицкий, С.В. Полишко, А.В. Семеняка, Е.А. Катюшин // Прикладная радиоэлектроника.—2011. — Т. 10, № 4. — С. 494–499.

14. Леховицкий Д.И. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть I. Теория решетчатых структур / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, В.П. Рябуха, Д.В. Атаманский // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 380–404.

15. Леховицкий Д.И. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть II. Алгоритмы настройки АРФ / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, В.П. Рябуха, Д.В. Атаманский // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 405–418.

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

17. Semeniaka A.V. The systolic design of two-dimensional and multidimensional lattice filters for space-time signal processing / A.V. Semeniaka, D.I. Lekhovitskiy, D.S. Rachkov // European Radar Conference EuRAD-2014: int. conf., 8–10 Oct. 2014, Rome, Italy: proc. — Rome, 2014. — P. 545–548.

18. Lekhovitskiy D.I. K-Rank modification of adaptive lattice filter parameters / D.I. Lekhovitskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka // IEEE International Radar Conference RadarCon-2015: int. conf., Arlington, USA: proc. — Arlington, 2015. — P. 127–132.

19. Леховицкий Д.И. Модифицированный метод парных импульсов для когерентных импульсных МРЛ с произвольными интервалами зондирования / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, Д.В. Атаманский, А.А. Пушков // Успехи современной радиоэлектроники.— 2012.—№ 3.—С. 25–45.

20. Леховицкий Д.И. Оценка ширины доплеровского спектра скоростей метеорообразований в когерентных импульсных МРЛ с произвольными интервалами зондирования / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, Д.В. Атаманский, А.А. Пушков // Успехи современной радиоэлектроники. — 2012. — № 8. — С. 47–67.

21. Lekhovytskiy D.I. Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: Spectrum width / D.I. Lekhovytskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka, V.P. Ryabukha, D.V. Atamanskiy // *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium: int. conf.*, 25–27 Aug. 2011, Kyiv, Ukraine: proc. — Kyiv, 2011. — P. 236–239.

22. Lekhovytskiy D.I. Improvement of accuracy of meteorological objects velocity unambiguous measurement in Doppler weather radars with staggered pulse repetition times / D.I. Lekhovytskiy, D.V. Atamanskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka // *Radioelectronics and Communications Systems*.— 2015.— Vol. 58, No. 9. — P. 385–403.

23. Lekhovytskiy D.I. Spectral moment estimation of weather echoes in pulsed Doppler weather radars: Mean power / D.I. Lekhovytskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka, V.P. Ryabukha, D.V. Atamanskiy // *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium: int. conf.*, 25–27 Aug. 2011, Kyiv, Ukraine: proc. — Kyiv, 2011. — P. 228–231.

24. Ryabukha V.P. Estimation of spatial weight vector fixation interval for sequential space-time signal processing against the background of combined interferences / V.P. Ryabukha, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka, Ie.A. Katiushyn // *Radioelectronics and Communications Systems*. — 2012. — V. 55, № 10. — P. 443–451.

25. Леховицкий Д.И. Влияние неортогональности и различия коэффициентов усиления квадратурных подканалов на эффективность пространственной обработки / Д.И. Леховицкий, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка, Д.В. Атаманский // *Прикладная радиоэлектроника*.— 2014. — Т.13, №1. — С. 29–34.

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

27. Rachkov D.S. Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar / D.S. Rachkov, D.I. Lekhovytskiy, A.V. Semeniaka, V.P. Riabukha, D.V. Atamanskiy // *International Radar Symposium IRS-2014: int. conf.*, 16–18 June 2014, Gdansk, Poland: proc. — Gdansk, 2014. — P. 215–219.

28. Rachkov D.S. Statistical analysis of ground clutter and point targets impact on accuracy of weather echoes parameters estimation / D.S. Rachkov, D.I. Lekhovytskiy, A.V. Semeniaka, V.P. Riabukha // *International Radar Symposium IRS-2015: int. conf.*, 24–26 June 2015, Dresden, Germany: proc.— Dresden, 2015. — P. 604–609.

29. Жуга Г.А. Особенности реализации решетчатых фильтров на основе цифровых сигнальных процессоров / Г.А. Жуга, А.В. Семеняка, Д.С. Рачков, Е.А. Катюшин // *Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010: 6-я междунар. молодежн. научн.-техн. конф.*, 19–24 апр. 2010, Севастополь, Украина: матер. конф. — СевНТУ, 2010. — с. 82.

30. Lekhovytskiy D.I. Statistical analysis of estimation accuracy of the meteorological formations parameters in pulsed Doppler weather radars with arbitrary staggering of pulse repetition intervals / D.I. Lekhovytskiy, D.S. Rachkov, A.V. Semeniaka [etc.] // *International Radar Symposium IRS-2011: int. conf.*, 7–9 Sept. 2011, Leipzig, Germany: proc. — Leipzig, 2011. — P. 273–278.

## АНОТАЦІЯ

**Семеняка А.В. Комбіновані адаптивні системи міжперіодної обробки сигналів в імпульсних оглядових РЛС. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2016.

Вирішена актуальна задача удосконалення адаптивних систем міжперіодної обробки (МПО) сигналів імпульсних оглядових РЛС різного призначення шляхом реалізації комбінованої адаптивної системи (КАС) МПО, яка на основі єдиного адаптивного решітчастого фільтру (АРФ) забезпечує одночасне відтворення неперервних енергетичних спектрів (НЕС) радіолокаційних відбиттів різної фізичної природи та селекцію рухомих цілей (СРЦ) на їх тлі.

Розвинута теорія «узагальнених аналізаторів» НЕС випадкових процесів, що пояснює «походження» великої кількості сучасних методів спектрального оцінювання (СО). Розроблені нові адаптивні методи СО на основі АРФ, доцільні для втілення в КАС МПО, які по обумовленим критеріям на 3–7 дБ краще, ніж класичні методи СО, відтворюють НЕС випадкових процесів різного фізичного походження.

Досліджені різновиди квазіоптимальних компенсаційно-фільтрових систем СРЦ та умови, за яких вони можуть бути більш ефективними та одночасно – більш простими у порівнянні з відомими. Обґрунтовано вибір адаптивної системи СРЦ на основі АРФ, доцільної для використання в КАС МПО, яка у порівнянні із широко розповсюдженими фільтровими системами СРЦ може забезпечити вигравш у пороговому сигналі на 10 – 20 і навіть більше дБ.

**Ключові слова:** імпульсна РЛС, міжперіодна обробка, спектральне оцінювання, селекція рухомих цілей, адаптивний решітчастий фільтр.

## ABSTRACT

**Semeniaka A.V. Combined adaptive systems of pulse-to-pulse signal processing in pulse surveillance radars.** – Manuscript.

The technical sciences candidate's thesis on specialty 05.12.17 – radio and television systems. Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2016.

It is solved an urgent problem on enhancement of adaptive pulse-to-pulse signal processing (PPSP) systems of various purposes pulse surveillance radars by implementing the combined adaptive system (CAS) of PPSP which on the basis of a single adaptive lattice filter (ALF) may simultaneously reproduce the continuous energy spectrum (CES) of radar echoes of various physical nature and moving target detection (MTD) against them.

It is developed the theory of “generalized analyzers” of random process' CES that explains “genesis” of large amount of modern spectral estimation (SE) methods. There are developed new adaptive SE methods on the basis of ALF reasonable for implementation in CAS PPSP that in specified criteria up to 3–7 dB better than classical SE methods in CES reproduction of random processes of various physical nature.

There are examined the variety of quasi-optimal MTD systems and conditions in which they may be more efficient and at the same time simpler in comparison with known. It is grounded the choice of adaptive MTD system on the basis of ALF reasonable for implementation in CAS PPSP that in comparison with widely applied filtering MTD systems may provide the gain in threshold signal up to 10 – 20 dB and even more.

**Keywords:** pulse radar, interperiod processing, spectral estimation, moving target detection, adaptive lattice filter.

## АННОТАЦИЯ

**Семеняка А.В. Комбинированные адаптивные системы междупериодной обработки сигналов в импульсных обзорных РЛС.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2016.

Решена актуальная задача совершенствования адаптивных систем междупериодной обработки (МПО) сигналов импульсных обзорных РЛС различного назначения путем реализации комбинированной адаптивной системы (КАС) МПО, которая на основе единого адаптивного решетчатого фильтра (АРФ) обеспечивает одновременное воспроизведение непрерывных энергетических спектров (НЭС) радиолокационных отражений различной физической природы и селекцию движущихся целей (СДЦ) на их фоне.

Развита теория «обобщенных анализаторов» НЭС случайных процессов. В их структуру укладываются классические и «несобственноструктурные» методы спектрального оценивания (СО). Предложены критерии качества оценивания НЭС, по которым определена эффективность известных методов в «предельных» условиях априори известных статистических характеристик входных воздействий и в «адаптивных» условиях замены их оценками, полученными по выборке конечного объема. Проанализированы компенсационно-фильтровые системы СДЦ на фоне пассивных помех (ПП) с широко используемым на практике «сглаживанием» импульсной характеристики (ИХ) когерентных накопителей импульсов пачки. Определена робастность к такому сглаживанию различных квазиоптимальных систем СДЦ, которая характеризуется их потерями в отношении сигнал / (помеха + шум) (ОСПШ) на выходе линейной части обработки. Разработана теория «трех ситуаций», объясняющая эти потери каждой из систем. По результатам анализа предложена структура на основе квазиобеляющего фильтра с нижней треугольной ленточной матричной ИХ (МИХ) и оценено быстродействие ее адаптивного варианта. Показано, что она имеет рекордное быстродействие и целесообразна для внедрения в составе существующих и перспективных импульсных РЛС. Показаны «экономные» способы решения задачи воспроизведения НЭС отражений и СДЦ на их фоне точечных целей на единой программно-алгоритмической структуре. Обосновано использование в качестве такой структуры адаптивных решетчатых фильтров (АРФ), более просто и эффективно учитывающих доступную априорную информацию о специфике структуры КМ входных воздействий. Проведены полунатурные испытания предлагаемой КАС МПО, результаты которых подтверждают теоретически обоснованную ее высокую эффективность. Обоснован выбор адаптивной системы СДЦ на основе АРФ, целесообразной для использования в КАС МПО, которая на 3–7 дБ лучше классических «сглаженных» Фурье-спектров воспроизводит НЭС отражений, а выигрыш по пороговому сигналу в сравнении с широко распространенными фильтровыми системами СДЦ может достигать 10–20 и даже более дБ.

**Ключевые слова:** импульсная РЛС, междупериодная обработка, спектральное оценивание, селекция движущихся целей, адаптивный решетчатый фильтр.

Підписано до друку 06.01.2017 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,16.  
Наклад 100 прим. Зам. № 00047

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) e-mail: [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)