

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О.С. ПОПОВА

Орлов Володимир Вікторович



УДК 004.942.001.57: 681.513.66

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА ТЕХНІКИ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЯВЛЕННЯ І
РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АДАПТИВНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ
КОРОТКОЧАСНИХ ЗАВАД

05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Військовій академії (м. Одеса), Міністерства Оборони України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Скачков Валерій Вікторович,
Військова академія (м. Одеса),
головний науковий співробітник Наукового центру
Військової академії (м. Одеса)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кошевий Віталій Михайлович,
Національний університет «Одеська морська академія»,
завідувач кафедри морського радіозв'язку;

доктор технічних наук, професор
Братченко Геннадій Дмитрович,
Одеська державна академія технічного регулювання
та якості,
проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків;

доктор технічних наук, доцент
Юхов Олександр Юрійович,
Національна академія Національної гвардії України,
м. Харків,
начальник кафедри військового зв'язку та інформатизації.

Захист відбудеться «18» грудня 2020 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.816.01, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, вул. Кузнечна, 1, 65029, м. Одеса.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова, вул. Кузнечна, 1, 65029, м. Одеса.

Автореферат розісланий «17» листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.І. Тіхонов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Забезпечення якісних показників систем дистанційного спостереження в умовах наростаючих терористичних загроз пов'язано з ускладненням і інтелектуалізацією локаційних систем. Значна роль в забезпеченні максимально вірогідної інформації при дистанційному спостереженні за об'єктами підвищеної небезпеки відводиться реєстрації різних фізичних процесів. Зокрема, рішенням завдань виявлення і розпізнавання віддалених або важкодоступних об'єктів в діапазонах електромагнітних і акустичних коливань, а також методам оброблення сигналів, що надходять з мережі датчиків.

Відсутність вірогідної інформації про наявність об'єкта може привести до неприпустимих екологічних і матеріальних втрат, а помилкові тривоги - до невиправданих додаткових витрат. У зв'язку з цим, важливим напрямком є забезпечення максимально вірогідної інформації, яку одержують шляхом аналізу випромінювань і відображень від об'єктів в умовах, де змінюються параметри поширення і короткочасних завад різного походження. Знизити вплив зазначених завад можливо шляхом вдосконалення адаптивних систем виявлення і розпізнавання (АСВ і АСР) сигналів.

Принципи синтезу оптимальних систем виявлення і розпізнавання сигналів з використанням байєсовських оцінок параметрів завад викладені в роботах вчених В.Г. Репіна, Г.П. Тартаковського, Я.А. Фоміна, Г.Р. Тарловського, RA Monzingo, T.W. Miller, J.T. Tou, R.C. Gonzalez, I.S. Reed, L.E. Brennan, C.F. Cowan, P.M. Grant, B. Widrow і ряді інших робіт. Розвиток методів побудови та адаптації систем виявлення і розпізнавання відображено в роботах Ю.Й. Абрамовича, В.М. Кошевого, П.Ю. Баранова, Д.І. Леховіцкого і ряді інших робіт, які засновані на ваговій фільтрації випадкових процесів, застосування навчальної вибірки для оцінювання коваріаційних матриць завад, зокрема, з урахуванням їх структурних властивостей. Недоліком існуючих адаптивних систем, що містять контур зворотного зв'язку, є велика тривалість адаптації, яка залежить від параметрів завад і може перевищувати інтервал стаціонарності короткочасних завад, що призводить до зростання числа помилок виявлення і розпізнавання. Проте спроби зменшення тривалості адаптації до короткочасних завад призводять до ускладнення алгоритмів оброблення сигналів, різкого зростання обсягу обчислювальних витрат.

У відомих літературних джерелах аналіз ефективності адаптації проведено з енергетичних критеріям якості, але недостатньо досліджені ймовірнісні характеристики виявлення і розпізнавання в умовах адаптації по коротким вибіркам. Це призводить до відсутності ймовірного контролю вірогідності прийнятих рішень, непередбачуваним ризикам при усуненні погроз від небезпечних об'єктів.

Розроблення АСВ і АСР пов'язано з необхідністю вирішення ряду протиріч:

- між забезпеченням достовірності рішень, прийнятих на короткочасних інтервалах існування досліджуваних процесів, і низькою точністю існуючих методів розрахунку ймовірностей помилок виявлення і розпізнавання в режимі адаптації;

- між підвищенням швидкодії алгоритмів адаптації до короткочасних завад і істотним збільшенням обчислювальних витрат при обмежених ресурсах;

– між темпами зростання вимог до можливостей перспективних систем і збільшенням витрат часу на їх розробку, моделювання та експериментальні дослідження.

Тому актуальною науково-прикладною проблемою стає розвиток теорії і техніки створення адаптивних систем спостереження за фізичними процесами для підвищення якісних характеристик локаційних систем виявлення і розпізнавання сигналів в умовах короткочасних завад різного походження при обмежених обчислювальних ресурсах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи безпосередно пов'язана з напрямками наукових досліджень, сформульовані в пп. 1.2.5.6, 1.2.9.1 в постанові « Про Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019-2023 роки», визначених постановою Президії НАН України від 30.01.2019 № 30.

Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи отримані автором при виконанні розділів ряду держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт, які виконуються за постановами КМУ та координаційних планів Міністерства освіти і науки України: НДР "Марганец" - "Синтез и исследование эффективности адаптивных алгоритмов обнаружения сигналов на фоне комплекса разнородных помех"(№ 9/124-57 Одеса, ОНПУ, інв. №135, 1994-1995), НДР " Разработка математических моделей радиолокационных отражений от морской поверхности, гидрометеоров и атмосферных турбулентностей" (№0196U023196, інв. №-299U001336, Одеса, ОНПУ, 1998), НДР "Підвищення ефективності операторської діяльності в суднових ергатичних системах на морському транспорті" (№0111U001609, Одеса, ОНМА, 2010-2012), НДР "Дослідження і розробка технічних засобів автоматизації процесів в суднових енергетичних установках" (№ДР0114U000342, Одеса, ОНМА, 2013-2017), де автор був виконавцем, НДР " Акустична система моніторингу терористичних погроз на водному транспорті" (№ДР0115U003576, Одеса, ОНМА, 2015-2016, де автор був відповідальним виконавцем).

В рамках НДР дисертантом були розроблені програмно-апаратні комплекси для аналітичного, імітаційного і натурального моделювання адаптивних систем локації, звукопеленгації і дистанційного моніторингу віддалених і важкодоступних об'єктів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якісних характеристик локаційних адаптивних систем виявлення і розпізнавання сигналів в умовах короткочасних завад, встановлення вимог до параметрів таких систем (розрядності, обчислювальним витратам і обсягу навчальної вибірки) на основі розвитку методів аналізу, синтезу та оптимізації.

Завдання дослідження. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Обґрунтувати критерії ефективності, математичних моделей і підхід до розроблення адаптивних систем виявлення і розпізнавання с контрольованою вірогідністю прийняття рішень в умовах короткочасних завад.

2. Створити методи аналізу вірогідності прийнятих рішень у вигляді

аналітичних залежностей ймовірностей виявлення і розпізнавання від параметрів адаптивних систем.

3. Розробити методи синтезу і оптимізації систем виявлення, які забезпечують в адаптивному режимі інваріантність систем до параметрів заводої обстановки.

4. Розробити метод аналізу помилок, викликаних кінцевою розрядністю цифрових адаптивних систем виявлення.

5. Розробити методи синтезу та аналізу багатоканальних адаптивних систем спільного виявлення і розпізнавання сигналів.

6. Розробити високоефективні обчислювальні архітектури адаптивних систем виявлення і розпізнавання.

7. Створити інформаційні технології, алгоритмічне забезпечення і програмно-апаратний комплекс для розроблення локаційних систем.

Об'єкт дослідження - процеси оброблення інформації в адаптивних системах виявлення і розпізнавання об'єктів.

Предмет дослідження - методи дослідження процесів оброблення інформації в локаційних адаптивних системах виявлення і розпізнавання об'єктів в умовах короткочасних завод.

Методи досліджень. Розроблення методів оптимізації та синтезу АСВ і АСР заснована на комплексному застосуванні теорії прийняття рішень та розпізнавання образів, методів адаптації при подоланні апріорної невизначеності. Для аналізу адаптивних систем використані аналітичні методи математичного моделювання та статистичного аналізу часових рядів. При дослідженні розрядності цифрових систем і обсягу обчислювальних витрат застосовувалися методи теорії матриць і математичного моделювання цифрових систем. Розроблення інформаційної технології (ІТ) для класифікації сигналів і завод заснована на теорії ідентифікації, класифікації та оцінювання параметрів випадкових процесів. Для створення натурних макетів на основі АСВ і АСР, застосовувалися методи експертних систем, імітаційного і натурального моделювання.

Наукова новизна. При виконанні роботи отримані наступні наукові результати:

1. Вперше запропоновано науково-методологічний підхід до забезпечення контролю вірогідності виявлення і розпізнавання при розробці адаптивних систем, який полягає в декомпозиції системних перетворень по помилках, внесених обмеженнями: на час спостереження сигналів і короткочасних завод, на розрядність і обсяг обчислювальних ресурсів. На відміну від існуючих підходів до розроблення адаптивних систем це дозволяє проводити синтез, аналіз і оптимізацію систем виявлення і розпізнавання з урахуванням ймовірностей помилок в порядку зростання параметричної невизначеності щодо моделей сигналів.

2. Вперше запропоновано метод аналізу вірогідності виявлення сигналів на фоні короткочасних завод в адаптивних системах на основі оцінок максимальної правдоподібності параметрів вхідного процесу; встановлені аналітичні залежності між вірогідністю помилок виявлення і ставленням сигнал/завада, а також параметрами систем адаптивного оброблення: пороговим рівнем і обсягом навчальної вибірки. На відміну від існуючих методів аналізу ефективності адаптації за критерієм сигнал/завада, відкриваються можливості розрахунку порогового рівня

для стабілізації ймовірності помилкової тривоги і оперативного контролю вірогідності виявлення в режимі адаптації до короткочасних завад.

3. Вперше розроблено метод аналізу вірогідності розпізнавання класів сигналів, встановлені аналітичні залежності ймовірностей помилок розпізнавання від обсягу навчальної вибірки, необхідної для формування еталонів класів. На відміну від відомих підходів на основі імітаційного моделювання, запропоновані аналітичні вирази враховують параметри моделей класів, кореляції між класами, рівень зашумленості навчальної вибірки, що дозволяє розрахувати її обсяг, необхідний для забезпечення заданої вірогідності розпізнавання.

4. Набув подальшого розвитку метод аналізу помилок, викликаних кінцевою розрядністю аналогово-цифрового перетворення систем виявлення, використовують прямі алгоритми адаптації на основі оцінювання коваріаційних матриць загальної структури. На відміну від відомих методів, які базуються на імітаційному моделюванні, отримано аналітичні вирази для розрахунку втрат через кінцеву розрядність. Встановлено, що такі втрати не залежать від обсягу навчальної вибірки, а визначаються параметрами сигнально-завадової обстановки.

5. Набули подальшого розвитку методи синтезу та аналізу багатоканальних адаптивних систем спільного виявлення і розпізнавання, що дозволяють на основі вдосконалення відомих вирішальних статистик забезпечити в режимі адаптації однакові порогові рівні в каналах виявлення, а також інваріантність розпізнавання класів до параметрів короткочасних завад.

6. Набув подальшого розвитку підхід до побудови адаптивних систем, що використовують оцінювання коваріаційних матриць тепліцевої форми, шляхом розроблення високоефективних обчислювальних архітектур на основі решітчастих структур. Застосування методу дозволило істотно розширити клас відомих лінійних і нелінійних вирішальних статистик, а також розроблених адаптивних систем виявлення і розпізнавання, для яких досягнуто зменшення обсягу обчислювальних витрат на порядок, до межі, пропорційної розміру вектору навчальної вибірки.

7. Набуло подальшого розвитку алгоритмічне забезпечення для створення моделей класів сигналів і короткочасних завад, на основі створення алгоритмів класифікації, що включають в себе операції визначення розміру вектора ознак образів, узгодження амплітуд і часової прив'язки в ансамблі образів, усунення короткочасних завад, визначення кластерів і побудови еталонів класів. Це дозволяє створити інформаційну технологію, яка на відміну від аналогів, автоматизує процеси створення моделей класів сигналів і короткочасних завад, забезпечує адекватність моделей, проведення аналізу завадозахищеності і ефективності для задач дистанційного виявлення і розпізнавання.

Практичне значення отриманих результатів.

1. В рамках НДР, виконаних автором в Одеському національному політехнічному університеті (ОНПУ), Одеської національної морської академії (ОНМА), Військової академії (м.Одеса), розроблені алгоритми адаптивного оброблення сигналів в умовах короткочасних завад. На етапах лабораторних, стендових випробувань експериментально досліджені характеристики АСВ і АСР далекої і ближньої дії. Створено комплекти програмного забезпечення для аналізу

ефективності на основі математичних моделей і експериментальних даних, що дозволили уточнити параметри створюваних зразків систем прийняття рішень.

2. За участю автора розроблена експертна система для оцінювання ефективності та оптимізації АСВ і АСР об'єктів акустичного випромінювання. Проведена оптимізація параметрів систем спільного виявлення і розпізнавання об'єктів, адаптація до короткочасних вітрових завад, що дозволило збільшити в 1,5 рази розміри зони контролю до 15 км.

3. На експериментальних стендах отримані моделі акустичних випромінювань, породжуваних протіканням теплоносіїв трубопроводів високого тиску парогенератора енергетичної установки. Визначено вимоги до характеристик датчиків і точності оцінок координат пошкоджень. Розглянутий підхід до побудови програмно-апаратного комплексу дозволив скоротити витрати і час проектування, зняти ряд невизначеностей, які існують при проектуванні систем контролю параметрів парогенератора.

4. Для моніторингу підводних транспортних трубопроводів розроблена система заводозахисту від акустичних завад, породжуваних роботою оточуючих механізмів. Аналіз експериментальних даних дозволив встановити параметри дефектів і завад, забезпечити заводозахисність адаптивних систем в умовах короткочасних завад при виявленні дефектів труб і вимірюванні витрати течі.

На основі методів математичного, імітаційного і натурного моделювання ряду комплексів локації створені аналітичні співвідношення, що зв'язують параметри проєктованих систем до вимог ефективності АСВ і АСР.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено: в ОКР «Модернізація АЗК-7», що проводилась казенним підприємством СКБ «Молнія» (м. Одеса) відповідно до Державного Замовлення для побудови дослідного зразка програмно-апаратного комплексу звуколокаційної системи дальньої дії. ТОВ "Телекарт-Прилад" (м. Одеса), Одеським НДІ судових експертиз, відділенням гідроакустики морського гідрофізичного інституту НАН України впроваджено в практику розроблення АСВ і АСО для дослідження ряду об'єктів, що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У наукових роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належить розроблення методів досліджень, синтезу, аналізу та оптимізації адаптивних систем цифрового оброблення сигналів. Здобувачем запропоновано підхід до розроблення адаптивних систем [36, 41, 42, 47, 49, 53, 78], запропоновані методи: оптимізації АСВ [11, 12, 14, 23, 24, 26, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 45, 51, 54, 60, 62, 64, 69, 70, 73], аналізу взаємозв'язків імовірнісних і енергетичних показників ефективності АСВ [3, 10, 15, 16, 20, 22, 28, 30, 31, 50, 55, 62, 68, 71, 75], аналізу ефективності АСР на основі залежностей ймовірностей помилок розпізнавання від числа навчальних вибірок [5, 8, 13, 21, 65], моделювання помилок кінцевої розрядності [17, 29, 43, 46, 57], синтезу та аналізу багатоканальних систем спільного виявлення і розпізнавання [6, 9, 25, 44, 48], обчислювальної реалізації [2, 4, 18, 19, 59, 63], розроблення ІТ моделювання систем локації, сигналів від об'єктів і короткочасних завад [7, 37, 38, 39, 52, 56, 63, 67, 73], практичної реалізації комплексів [1, 40, 58, 61, 66, 72, 74, 76, 77].

Апробація роботи. Наукові результати та основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на науково - технічних конференціях і семінарах професорсько-викладацького складу ОНПУ, ОНМА, Військової академії, на 34 міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема: TCSET'2000 міжнародної конференції "Сучасні проблеми засобів телекомунікації, комп'ютерної інженерії та підготовки кадрів" Львів, 2000 р.; міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми физической и биомедицинской электроники" Київ, 2000 р.; з 1-ї по 16-у міжнародну науково-практичну конференцію "Современные информационные и электронные технологии", Одеса, 2000-2015р.; міжнародних конференціях з управління "Автоматика-2000", Львів, 2000р.; "Автоматика-2003", Севастополь, 2003р.; "Автоматика-2005", Харків, 2005 р.; "Автоматика-2006", Вінниця, 2006р.; "Автоматика-2008", Одеса, 2008 р; "Автоматика-2010", Харків, 2010р; 9-ї і 10-ї міжнародних конференціях "Контроль і управління в складних системах", Вінниця, 2008р.; Вінниця, 2010р.; "Автоматика-2012", Київ, 2012р.; "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи", Київ, 2013р.; "Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи", Одеса, 2019; "Кібербезпека в Україні: правові та організаційні питання" Одеса, 2019 р.; "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил", Київ, 2019 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 77 наукових робіт, з них: 35 статей у виданнях за діючими, на момент публікації, переліками ВАК України, 1 стаття в іноземному науковому періодичному віданні [32], 42 тези доповідей в роботах міжнародних і всеукраїнських конференцій. У журналах, що містяться в міжнародних наукометричних базах, опубліковано 12 статей, з них: 3 - у Web of Science [12, 33, 36] журналів категорії "А" спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка, 7 - в Index Copernicus [17, 22, 34, 35, 20, 27, 29], , 2 в Google Scholar [21, 28]. Усього одноосібних статей - 21.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків і додатку, включає в себе 351 сторінка машинописного тексту, 126 рисунків, 10 таблиць, список літератури з 392 назвами і 2 додатки на 12 сторінках. Додатки містять список наукових праць автора і акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, викладені основні наукові і практичні результати, які виносяться на захист.

У першому розділі – "Аналіз основних етапів розвитку теорії і техніки адаптивних систем виявлення та розпізнавання сигналів в умовах короткочасних завад" проведені дослідження сучасного стану методів аналізу і синтезу АСВ і АСР в умовах короткочасних завад, сформульовані основні напрямки і завдання досліджень. Схема процесу оброблення інформації в комп'ютеризованій системи виявлення та розпізнавання для вирішення завдань локації і моніторингу

ілюструються на рис.1. Тут застосовується розподілена мережа датчиків для прийому сигналів S від досліджуваних об'єктів в умовах заважаючих віддзеркалень і випромінювань X . Априорна невизначеність щодо параметрів сигналів S визначається особливостями об'єкта випромінювання. При цьому істотний вплив на якість класифікації при побудові моделей класів сигналів, а в подальшому на ефективність виявлення і розпізнавання, вносить середовище поширення, що спотворює форму сигналу $f(S)$, в сукупності з короткочасними і стаціонарними завадами X . Додаткові помилки виникають в процесорі адаптивного цифрового оброблення сигналів через кінцеву розрядність АЦП і обмежений інтервал адаптації (по K векторах розміру N вхідних даних), що призводять до похибок оцінок параметрів сигналів \hat{S} , коваріаційної матриці завад \hat{R} . Результатом оброблення інформації в АСВ і АСР є прийняття одного (1-ого) з $0, \dots, M$ рішень про відсутність або наявність віддаленого об'єкта ($i=0,1$) а також віднесення до одного з класів ($i>1$). Для оперативного оцінювання ризику важливо визначення вірогідності прийнятих рішень за прийнятими моделям ймовірносних характеристик досліджуваних процесів. При цьому необхідно встановити вимоги до обсягу навчальної вибірки і розрядності АЦП вхідних даних для забезпечення заданої помилки розпізнавання. Проте існуючі методики складні або отримані статистичним моделюванням лише для обмеженої області параметрів. При комплексуванні багатоканальних систем виявлення і розпізнавання потрібен розвиток методик для аналізу системи спільного виявлення-розпізнавання, зменшення обсягу обчислювальних витрат, розрахунку порогових рівнів та визначення вірогідності рішень на межі зони контролю.

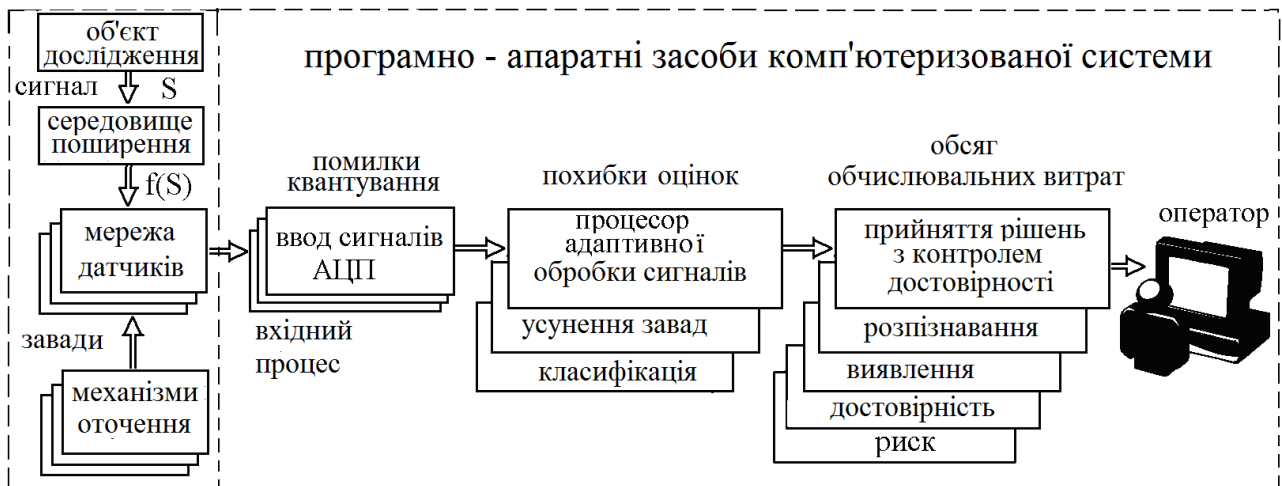


Рис. 1.Схема процесу оброблення інформації

Для розширення зони контролю і підвищення вірогідності виявлення і розпізнавання ударних і вибухових об'єктів акустичного випромінювання, віддалених до десяти кілометрів, необхідно розроблення систем дальньої дії для прийому зовнішніх сигналів з адаптивною налаштуванням в умовах короткочасних атмосферних завад. З метою запобігання аварійних ситуацій на трубопроводах енергетичних установок, а також підвищення надійності та живучості блоків, які працюють в умовах агресивного середовища, актуальним завданням є створення

комплексів ближньої дії, заснованих на локації джерел акустичного випромінювання з пошкоджень на фоні короточасних завад, породжуваних роботою механізмів оточення.

У другому розділі – "Науково-методологічний підхід до дослідження адаптивних систем виявлення та розпізнавання сигналів" проводиться розроблення підходу до побудови систем з контрольованою вірогідністю прийняття рішень і методів аналізу ймовірносних характеристик, синтезу та оптимізації адаптивних систем виявлення і розпізнавання для різних моделей сигналів.

Ймовірності помилок p_{ij} обчислюються на основі прикладного програмного забезпечення з використанням результатів ідентифікації вимірювань вхідного процесу (оцінок параметрів кореляційних і спектральних властивостей, відносини сигнал/завада) і параметрів АСВ і АСР (порога виявлення, розрядності, інтервалу навчання та ін.). Для операційного рішення визначається ризик рішення оператора $\Delta_i = \sum_{j=0}^M \Pi_{ij} p_{ij}$ за байесовим критерієм здійснюється на основі ймовірностей помилок p_{ij} рішень АСВ і АСР і відповідних їм плат Π_{ij} за помилки прийняття i -ого рішення при j -ом стані об'єкта. Плати визначені заздалегідь за результатами аварій і збитків від невірних рішень, отриманих за період експлуатації аналогічних об'єктів.

Для розроблення адаптивних систем виявлення і розпізнавання пропонується критерій мінімізації середнього ризику при обмеженому обсязі обчислювальних витрат $f(N, M)$

$$\Delta = \min_{N, K, B} \sum_{i=0}^M \Delta_i, \quad \text{при} \quad f(N, M) = \text{const}, \quad (1)$$

який полягає у виборі оптимальних параметрів складності системи N, M , обсягу навчальної вибірки K і розрядності B . Обчислювальні витрати $f(N, M) = a_{\times} N_{\times} + a_{+} N_{+} + a_{\Phi\Pi} N_{\Phi\Pi} + a_{OЗУ} N_{OЗУ}$ представлені кількістю операцій множення N_{\times} , складання N_{+} , функціональних перетворювачів $N_{\Phi\Pi}$ і розміром пам'яті $N_{OЗУ}$ з вагами $a_{\times}, a_{+}, a_{\Phi\Pi}, a_{OЗУ}$, що визначають вартість при апаратної реалізації або швидкодію при програмної реалізації.

Так як при синтезі систем не завжди відомі плати за помилки, то запропонований підхід полягає в декомпозиції ризику шляхом мінімізації кожної з ймовірностей помилок. Тоді синтез і оптимізація систем проводиться для всіх ймовірностей помилок p_{ij} , кожна з яких представлена сумою парціальних збільшень ймовірності

$$p_{ij} = \min_{N, K, d} p_{ij}(N, M) + \delta p_{ij}(N, M, K) + \delta p_{i,j}(N, M, K, B), \quad i, j = 0, \dots, M \quad (2)$$

де $p_{ij}(N, M)$ - потенційна ймовірність помилки оптимальної системи заданої складності N, M , досяжна в разі відомих параметрів сигнально-завадової

обстановки, при відсутності адаптації та апаратурних помилок комп'ютеризованих систем;

$\delta p_{ij}(N, M, K) = p_{ij}(N, M, K) - p_{ij}(N, M)$ - приріст ймовірності помилки, обумовлений процесами адаптації за навчальною вибіркою обсягу K ;
 $\delta p_{ij}(N, M, K, B) = p_{ij}(N, M, K, B) - p_{ij}(N, M, K)$ - приріст ймовірності помилки, обумовлений обмеженою розрядністю B цифрової системи.

Методика оптимізації полягає в послідовному визначенні параметрів (спочатку K , потім B при заданій складності систем N , які забезпечують допустимі межі вірогідності прийнятих рішень (прийнятні збільшення вірогідності помилок). При цьому синтез і аналіз систем проводиться в порядку ускладнення завдань: $M = 1$ (бінарне виявлення), розпізнавання $M \geq 2$ класів і спільне виявлення- розпізнавання. Для кожного завдання пропонується досліджувати системи в порядку підвищення апіорної невизначеності щодо параметрів сигналів і завад.

Запропоновано метод синтезу правила прийняття спільних рішень з виявлення та розпізнавання і вирішальних статистик d , в якому застосований критерій мінімізації середнього ризику при фіксованій ймовірності помилкової тривоги

$$\Delta = \min_d \Delta(d) = \Delta^{обн}(d) + \Delta^p(d) = \sum_{m=1}^M \Delta_m^{обн} + \sum_{m=1}^M \Delta_m^p, \text{ при } F(d) = const, \quad (3)$$

де умовні ризики прийняття рішень про виявлення $\Delta_m^{обн}$ і розпізнаванні Δ_m^p , помилкової тривоги $\Delta_m^{ЛТ}$ і пропуску сигналу $\Delta_m^{ПС}$ зв'язані співвідношеннями

$$\Delta_m^{обн} = \Delta_m^{ЛТ} + \Delta_m^{ПС} = \Pi_m^{ЛТ} F_m + \Pi_{m,i}^{ЛТ} F_{m,i} + \Pi_m^{ПС} (1 - D_m), \quad \Delta_m^p = \sum_{i \neq m}^M \Pi_{m,i} P_{m,i}^p \quad (4)$$

з ймовірністю правильного виявлення D_m , помилковими тривогами m -ого каналу при наявності i -ого класу $F_{m,i}$ ($i \neq m$) та у відсутності сигналу $F_{m,0}$, можливостями помилок розпізнавання m -ого класу при наявності i -ого класу $p_{m,i}^p$, платами за помилкову тривогу $\Pi_m^{ЛТ}$, пропуск сигналу $\Pi_m^{ПС}$ і помилку розпізнавання $\Pi_{m,i}$. Рівномірно найбільш потужне правило $z(d_1, \dots, d_M, Y)$ полягає у виборі рішення, запропонованого максимальної з приватних статистик $d_m(Y)$, які перевищили пороговий рівень

$$z(d_1, \dots, d_M, Y) = \begin{cases} m, & d_m(Y) = \max_{i \in 1..M} d_i(Y), \quad d_m(Y) > c_m \\ 0, & d_i(Y) \leq c_i, \quad i = 1..M \end{cases} \quad (5)$$

В умовах апіорної невизначеності щодо параметрів сигнально-завадової обстановки проводиться адаптація відповідно до адаптивного байесового підходу шляхом підстановки максимально правдоподібних оцінок у вирішальні статистики $d_m(Y)$. У разі нормально розподілених процесів сигнально-завадових обставин

формується оцінки невідомої коваріаційної матриці $\hat{\mathbf{R}}_{\Pi} = \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^T / K$ розміру $N \times N$

і вектора сигналу $\hat{\mathbf{S}} = \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_k / K$ розміру N по K векторах навчальної вибірки. Такий підхід забезпечує для (5) належність до незміщеним рівномірно найбільш потужним правилам.

Розроблено методику аналізу вірогідності рішень систем спільного виявлення-розпізнавання. Методика складається з етапів: розрахунку ймовірностей помилок роздільних багатоканальних систем виявлення і розпізнавання, потім розрахунку ймовірностей помилок для суміщеної системи за рахунок узагальнення поняття про помилки першого і другого роду. При цьому використовуються зв'язок ймовірностей помилкової тривоги F_1 , F_M одноканальної і M -канальної системи виявлення, а також ймовірностей правильного виявлення D_1 , F_1 одноканальної системи і $D_{M,1}$ одного каналу M -канальної системи, які визначаються у вигляді співвідношень

$$F_M = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - F_m) \approx MF_1, \quad D_{M,1} = 1 - (1 - D_1) \prod_{m=2}^M (1 - F_m) \approx D_1. \quad (6)$$

Показники якості системи спільного виявлення-розпізнавання ускладнюються через $M-1$ альтернативних рішень вибору номера класу. При цьому ймовірність правильного розпізнавання $p_{m,m}$ з урахуванням виявлення m -ого класу визначається утворенням $p_{m,m} = D_m \cdot p_{m,m}^p$ ймовірності виявлення D_m і розпізнавання $p_{m,m}^p$ після відбору максимуму при помилковій тривозі F_m .

З урахуванням нестачі апріорних відомостей про фізичну природу досліджуваних процесів (відсутності інформації про форму сигналів, різноманітність станів різних об'єктів і поділом інформаційних сигналів на класи) запропонований підхід полягає в послідовній розробці методів аналізу і синтезу та оптимізації систем для різних моделей випадкових процесів в порядку зростання апріорної невизначеності щодо невідомих параметрів.

У третьому розділі – "Методи аналізу, синтезу та оптимізації адаптивних систем виявлення сигналів в умовах короткочасних завад" проводиться розроблення ряду адаптивних систем виявлення для різних моделей сигналів (імпульсних сигналів відомої і невідомої форми, випадкових сигналів) на основі методів аналізу ймовірносних характеристик, синтезу та оптимізації систем. Для систем виявлення широко поширений синтез вирішальних статистик за критерієм Неймана-Пірсона, який гарантує максимальну ймовірність правильного виявлення D при заданій ймовірності помилкової тривоги F . Так як навчання АСВ проводиться на обмежених часових інтервалах, то флуктуації оцінок невідомих параметрів приводять до неконтрольованої зміни закону розподілу вирішальних статистик і ймовірностей помилок (2) $p_{10}(N, M, K) = F$ і $p_{01}(N, M, K) = 1 - D$. Розроблено метод аналізу адаптивних систем по ймовірносним критеріям для контролю вірогідності -

визначення залежностей ймовірності помилкової тривоги $F(c, K, N)$ і правильного виявлення $D(Q, K, N)$ з урахуванням порога c і відносини сигнал/завада Q перед порівнянням з порогом.

Метод розрахунку ймовірностей полягає в інтегруванні щільності розподілу вирішальної статистики у відсутності сигналу $\omega_{\Pi}(D(\mathbf{Y}), \hat{\mathbf{R}}_{\Pi})$ і при наявності сигналу $\omega_{c+\Pi}(D(\mathbf{Y}), \hat{\mathbf{R}}_{\Pi})$ по випадковим параметрам $\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{R}}_{\Pi}$ в області $d(\mathbf{Y}) > c$ перевищення вирішальною статистикою порога

$$F(c) = \int_c^{\infty} \int_{\mathbf{Y}} \omega_{\Pi}(d(\mathbf{Y}), \hat{\mathbf{R}}_{\Pi}) \omega(\hat{\mathbf{R}}_{\Pi}) d\mathbf{Y} d\hat{\mathbf{R}}_{\Pi}, \quad (7)$$

$$D(Q) = \int_c^{\infty} \int_0^1 \omega_{c+\Pi}(d(\mathbf{Y}), \hat{\mathbf{R}}_{\Pi}) \omega(\hat{\mathbf{R}}_{\Pi}) d\mathbf{Y} d\hat{\mathbf{R}}_{\Pi}, \quad (8)$$

де $\omega(\hat{\mathbf{R}}_{\Pi})$ - щільність розподілу ковариаційної матриці, що підкоряється розподілу Уїшарта. Визначення аналітичних виразів для ймовірностей помилок виявлення засноване на виборі таких відомих моделей вхідних процесів і оцінок їх параметрів, які дозволяють провести математичні операції усереднення ймовірностей правильного виявлення і помилкової тривоги по щільності розподілу оцінок.

Спочатку досліджуються системи виявлення сигналів відомої форми в умовах нормально розподілених завад з невідомою ковариаційною матрицею \mathbf{R}_{Π} , що володіють найбільшою ефективністю. Рішення про наявність сигналу приймається в разі перевищення $d(\mathbf{Y})$ над пороговим рівнем c , помноженому на оцінку потужності \hat{P}_{Π} вихідного процесу

$$d(\mathbf{Y}) = |\hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{Y}|^2 > c \cdot \hat{P}_{\Pi}, \text{ або } d(\mathbf{Y}) = |\mathbf{S}_0^T \hat{\mathbf{R}}_{\Pi}^{-1} \mathbf{Y}|^2 > c \cdot \mathbf{S}_0^T \hat{\mathbf{R}}_{\Pi}^{-1} \mathbf{S}_0, \quad (9)$$

де $\mathbf{Y} = \mathbf{X} + \mathbf{S}$ - вектор розміру N вибірки оброблюваного процесу, що містить аддитивну суміш завади \mathbf{X} і сигналу $\mathbf{S} = q_k \mathbf{S}_0$ відомої форми \mathbf{S}_0 і невідомої амплітуди q_k , що підкоряється нормальному розподілу $q_k \sim (0, q)$ з нульовим середнім і потужністю q ; $\hat{\mathbf{R}}_{\Pi} = K^{-1} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T$ - оцінка ковариаційної матриці завад, отримана по K векторах $\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_K$ класифікованої навчальної вибірки завади; $\hat{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{R}}_{\Pi}^{-1} \mathbf{S}_0$ - вектор адаптивного оброблення у вигляді оцінюваних вагових коефіцієнтів; T - знак комплексного сполучення і транспонування.

Аналіз проведено для загального випадку лінійних обмежень $M < N$, що накладаються на ваговий вектор $\hat{\mathbf{W}}$ адаптивного оброблення. Математичне формулювання задачі оптимізації АСВ за критерієм мінімуму P_{Π} вихідної потужності завад

$$P_{\Pi}(\hat{\mathbf{W}}) = \min_{\hat{\mathbf{W}}} \hat{\mathbf{W}}^T \hat{\mathbf{R}}_{\Pi} \hat{\mathbf{W}} \text{ при } \mathbf{V}^T \hat{\mathbf{W}} = \mathbf{U}. \quad (10)$$

Її рішення $\hat{\mathbf{W}}$ у вигляді вагового вектора і вирішальна статистика $d(\mathbf{Y})$ представлені в формі

$$\widehat{W} = \widehat{R}_{\Pi}^{-1} V (V^T \widehat{R}_{\Pi}^{-1} V)^{-1} U; \quad d(Y) = |\widehat{W}^T Y|^2 > c \cdot \widehat{P}_{\Pi}, \quad (11)$$

де M обмежень задані у вигляді вектора U розміру M і матриці $V = (S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0M})$ розміру $N \times M$, що складається з M опорних векторів. В результаті ряду перетворень (7), (8) над вирішальною статистикою $d(Y)$ (11) визначено залежності ймовірностей правильного виявлення D і помилкової тривоги F від порогового рівня c і числа векторів навчальної вибірки K у вигляді

$$D(Q) = \frac{K!}{(K+M-N)!(N-M-1)!} \sum_{l=0}^{N-M-1} \frac{(-1)^l C_{N-M-1}^l}{v^{K+M-N+l}} \cdot (1 - e^{-v} \sum_{i=0}^{K+M-N+l} v^i / i!); \quad F = D(Q=0), \quad (12)$$

де $v = c / [(1+Q)P_{\Pi}]$. Залежності $F(c)$ показані на рис.2 для $N-M=10$ і $K = 2(N-M+1)$ векторів, а $D(Q)$ наведені на рис.3 при $F=10^{-6}$. Проведено порівняння з існуючим методом апроксимації робочих характеристик

$$F = \exp\{-c / (\eta P_{\Pi})\}; \quad D = F^{1/(1+\rho Q)} \quad (13)$$

(штрихові лінії), якій передбачає незмінність закону розподілу при адаптації і враховує, що флуктуації вагових коефіцієнтів \widehat{W} вносять тільки енергетичні втрати в відношенні сигнал/завада (с/з) ρ і потужності завад η

$$\rho = E \left\{ \frac{\widehat{P}_C / \widehat{P}_{\Pi}}{P_C / P_{\Pi}} \right\} = E \left\{ \frac{|\widehat{W}^T S|^2 / \widehat{W}^T R_{\Pi} \widehat{W}}{|W^T S|^2 / W^T R_{\Pi} W} \right\} = \frac{K+1-N+M}{K+1}; \quad \eta = E \left\{ \frac{\widehat{P}_{\Pi}}{P_{\Pi}} \right\} = \frac{K}{(K-N+M)} \quad (14)$$

в порівнянні з граничними (при $K \rightarrow \infty$) енергетичними параметрами.

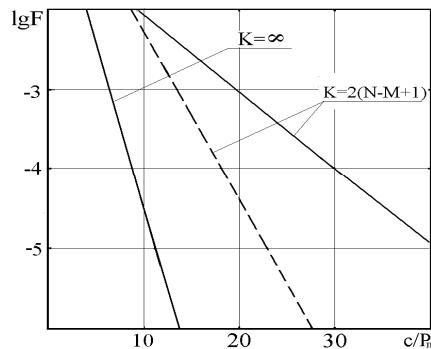


Рис. 2. Залежності F від порога

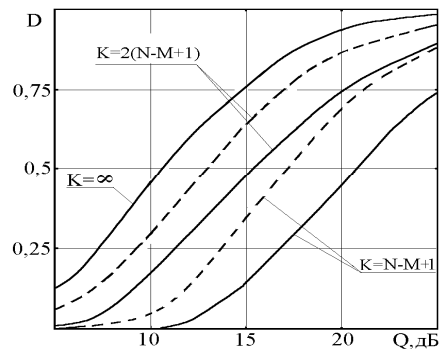


Рис. 3. Залежності D від с/з

Аналіз рис.2 показав, що апроксимація (13) призводить до зниження вірогідності виявлення через істотне зниження порогового рівня, що не дозволяє стабілізувати рівень помилкових тривог. Отримані залежності (рис.3) дозволили уточнити, що втрати ρ, η через адаптації значно перевищують раніше відомі (14) і становлять близько 5 ... 6 дБ для $D=0,5$. Причому втрати зростають при завданні

великих значень порогів c і менших ймовірностей помилкової тривоги, так як "хвости" розподілів істотно відрізняються від нормального закону.

В окремому випадку, для систем з одним лінійним обмеженням ($M=1$, $\mathbf{S}_0^T \widehat{\mathbf{W}} = 1$), ваговий вектор (11) збігається з $\widehat{\mathbf{W}} = \widehat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}_0 / (\mathbf{S}_0^T \widehat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}_0)$ з точністю до постійного множника, а характеристики виявлення визначаються (12) при $Q = q \mathbf{S}_0^T \mathbf{R}_\Pi^{-1} \mathbf{S}_0$. Недоліком таких систем в умовах, що змінюються параметрів завод \mathbf{R}_Π є порушення стабільності вихідної потужності завод $\widehat{P}_\Pi = \widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{R}_\Pi \widehat{\mathbf{W}} = (\mathbf{S}_0^T \widehat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}_0)^{-1}$, що призводить до стрибків порогів $c \cdot \widehat{P}_\Pi$ і істотно знижує вірогідність рішень. Розроблено аналітичний метод оптимізації систем, інваріантних до невідомих параметрах завод, суть якого полягає в забезпеченні сталості потужності завод ($P_\Pi = \mathbf{W}^T \mathbf{R}_\Pi \mathbf{W} = 1$) За рахунок вибору квадратичного обмеження на вектор вагових коефіцієнтів при постановці завдання максимізації с/з. Метод формалізований у вигляді завдання оптимізації функціоналу від відносин квадратичних форм при квадратичному обмеженні, отримані ваговий вектор і вирішальна статистика

$$\max_{\mathbf{W}^T \mathbf{R}_\Pi \mathbf{W} = 1} P_C(\mathbf{W}) / P_\Pi(\mathbf{W}) = \max_{\mathbf{W}^T \mathbf{R}_\Pi \mathbf{W} = 1} |\mathbf{W}^T \mathbf{S}_0|^2 / \mathbf{W}^T \mathbf{R}_\Pi \mathbf{W}, \quad (15)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_\Pi^{-1} \mathbf{S}_0 / (\mathbf{S}_0^T \mathbf{R}_\Pi^{-1} \mathbf{S}_0)^{0,5}, \quad d(\mathbf{Y}) = |\widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{Y}|^2 > c. \quad (16)$$

Дослідження ефективності адаптації статистики (12) з нормування потужності завод показало, що збіжність вихідної потужності заводи

$$E\{\widehat{P}_\Pi\} = E\{\widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{R}_\Pi \widehat{\mathbf{W}}\} = K^2 / [(K - N)(K - N + 1)] \quad (17)$$

не залежить від параметрів завод. Відповідно до методу (7) - (8) отримано, що ймовірність помилкової тривоги визначається тільки об'ємом навчальної вибірки і порогом

$$F = 1 - \sum_{i=1}^{K-N+1} \frac{c^i}{i!} \frac{K!(K-N-1+i)!}{(K+i+1)!(K-N+1-i)!} \cdot {}_2F_1(K-N+i+2, K-1; K+i+1; -c) \quad (18)$$

де ${}_2F_1$ – гіпергеометрична функція. Порівняльний аналіз імовірнісних характеристик систем (16) і (11) при $M=1$ показав, що системи близькі по ефективності, а їх робочі характеристики $D(Q)$ незначно відрізняються.

Так як вихідна потужність завод системи (16) інваріантна до параметрів \mathbf{R}_Π і стабілізована до одиничного рівня, то значення вихідного процесу $d(\mathbf{Y})$ в реальному часі відповідає відношенню сигнал/завада Q , яке порівнюється з порогом. Це відкриває можливість розрахунку ймовірностей помилок безпосередньо в процесі виявлення та забезпечення контролю за вірогідністю рішень АСВ в реальному масштабі часу.

Для моделі сигналу невідомої форми \mathbf{S}_0 і випадкової амплітуди q_k відповідно до (7)-(8) проведено дослідження ймовірносних характеристик нелінійного оброблення на основі тесту Хотеллінга, який є оптимальним для задачі виявлення сигналу з невідомим середнім $\mathbf{S} = q_k \mathbf{S}_0$ на фоні нормально розподілених корельованих завад. Вирішальна статистика представляється у вигляді квадратичної форми, яка дорівнює $d = \mathbf{X}^T \widehat{\mathbf{R}}_{II}^{-1} \mathbf{X}$ у відсутності сигналу і $d = (\mathbf{X} + \mathbf{S})^T \widehat{\mathbf{R}}_{II}^{-1} (\mathbf{X} + \mathbf{S})$ при наявності сигналу. Визначено щільність розподілу вирішальної статистики при наявності сигналу, яка підпорядковується нецентральному F-розподілу з параметром нецентральності $Q = P_C / P_{II} = q \mathbf{S}_0^T \mathbf{R}_{II}^{-1} \mathbf{S}_0$. Імовірносні характеристики обчислюються шляхом чисельного інтегрування щільності розподілу. Аналіз ефективності показав, що забезпечення ймовірності правильного виявлення рівною 0,5 і помилкової тривоги $F < 0,01$ досягається застосуванням $K > 4N$ векторів навчальної вибірки при втратах в с/з через адаптації менш 3 дБ у порівнянні з оптимальною неадаптивною системою ($K \rightarrow \infty$). Зі зменшенням задається ймовірності помилкових тривог зростають вимоги до обсягу навчальної вибірки.

Для моделі випадкового сигналу с нульовим середнім $\bar{\mathbf{S}} = 0$ досліджено ефективність двоканального кореляційного оброблення $d(\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2) = \mathbf{Y}_1^T \mathbf{R}_{II}^{-1} \mathbf{Y}_2$, де вибірки 1 і 2 каналів $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{X}_1 + \mathbf{S}_1$, $\mathbf{Y}_2 = \mathbf{X}_2 + \mathbf{S}_2$. При цьому потрібно було, щоб інформаційні процеси збігалися $\mathbf{S}_1 = \alpha \mathbf{S}_2$ з точністю до амплітудного множника α , а завади є некорреліованими між каналами $\overline{\mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2^T} = 0$. Показано, що ефективність адаптації до завад близька до тесту Хотеллінга. Встановлено вимоги до порогу виявлення і показано, що збільшення розміру вибірки N в 4 рази необхідно підвищити граничний рівень приблизно в 2 рази для забезпечення незмінною ймовірності помилкової тривоги.

У порівнянні з відомими, розроблені методи аналізу і синтезу АСВ забезпечують: оптимізацію параметрів систем, визначення вимог до числа навчальних вибірок; контроль за вірогідністю виявлення в умовах апріорної невизначеності.

У четвертому розділі – "Методи класифікації сигналів і аналізу адаптивних систем розпізнавання сигналів в умовах короткочасних завад" створена інформаційна технологія (ІТ) розроблення пасивних локаційних систем розпізнавання, що складається з алгоритмічного забезпечення класифікації сигналів, аналізу ефективності розпізнавання класів акустичних випромінювань і дослідження завадозахищеності в умовах короткочасних завад.

Створено алгоритмічне забезпечення ІТ на основі ідентифікаційних вимірювань сигналів, породжених об'єктами випромінювання різних класів. ІТ складається з послідовності операцій по виділенню інформаційних ознак, кластеризації та формування еталонів, створення спрощених моделей класів сигналів. Для цього застосовується уявлення образу класу у вигляді вибірки тимчасової реалізації експериментальних даних, в якій ознаками є відліки зашумленого типового сигналу, що підлягає відновленню. На етапі виділення ознак враховуються зашумленість даних, відмінність сигналів \mathbf{Y}_i по тривалості N , часу

приходу t_{0i} і амплітуді u_i . Підготовка первинної інформації здійснюється для формування образів шляхом попереднього оброблення реалізацій. Синтезований алгоритм за критерієм мінімізації СКО між K образами одного класу

$$\sigma^2 = \min_{N, t_0, U} \sum_{i,j=1}^K ((X_i(t) - u_i X_j(t - t_0))^T ((X_i(t) - u_i X_j(t - t_0))) = \min_U \min_{t_0} \min_N \sigma^2(N, t_0, U) \quad (19)$$

Алгоритм складається в оптимізації по кожному з параметрів, послідовно виконується наступними процедурами: визначення часової прив'язки t_{0j} шляхом зрушень кожної j -ої з K вибірок ансамблю щодо однієї (i -ої) вибірки для досягнення мінімуму СКВ $\sigma^2(t_{0j}) = \min_{t_{0j}} (Y_i(t) - Y_j(t - t_{0j}))^T (Y_i(t) - Y_j(t - t_{0j}))$; вибір

розміру вектора вибірки шляхом збільшення N до межі, що забезпечує максимум сигнал/шум $V(N) = \max_N \int_0^N y(t) dt / N\sigma^2$; нормування амплітуд до одиничної енергії

$u_j = 1/(Y_j^T Y_j)^{1/2}$. Так як серії експериментів одного класу проводяться в відмінних умовах, що призводять до різних спотворень сигналів, то проводиться формування ансамблів з близьких образів, що розглядаються в термінах кластерів; потім об'єднання найближчих кластерів і відкидання малоінформативних. Кластери формуються з ансамблів образів, отриманих за серіями однотипних експериментів, які визначаються параметрами векторів середніх, дисперсій і кількістю образів. Для бракування віддалених кластерів, уражених короткочасними завадами, використовується інформація про відмінності між векторами їх середніх S_i і S_j

шляхом обчислення кореляції $r_{ij} = S_i^T S_j / (S_i^T S_i \cdot S_j^T S_j)^{1/2}$ між близькими і віддаленими кластерами. З метою подальшого зменшення числа кластерів розроблено алгоритм їх злиття, що враховує їх кореляцію, середньоквадратичне відхилення і кількість образів в кластерах. В результаті побудовані еталони класів у вигляді векторів оцінок середніх \hat{S}_i , отриманих за векторами результуючих кластерів. Запропонована процедура ідентифікаційних вимірювань сигналів для отримання образів і еталонних сигналів дозволила автоматизувати оброблення реалізацій, скоротити на порядок час виготовлення еталонів, знизити середньоквадратичне відхилення оцінок еталонів на 15%, зменшити число малоінформативних образів приблизно в 1,5 рази.

Розв'язана задача визначення обсягу навчальної вибірки для оцінювання еталонів \hat{S}_i за критерієм заданої вірогідності розпізнавання. При цьому використовується відмінність векторів середніх $S_i \neq S_j$ і рівність коваріаційних матриць флуктуацій еталонів i, j -ого класів $R = R_i = R_j$, що призводить до лінійного функціоналу від відношення правдоподібності

$$d_{ij}(Y) = Y^T R^{-1} (S_i - S_j) - 0,5(S_i + S_j)^T R^{-1} (S_i - S_j) > c_{i,j} \quad (20)$$

підкоряється нормальному розподілу. Ефективність (20) повністю визначається енергетичним критерієм у вигляді $v_{ij} = (\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j)$ -відстані Махаланобіса, однозначно пов'язаної з вірогідністю помилок розпізнавання. Метод заснований на загальних теоретичних передумовах ($\mathbf{R} = \mathbf{R}_i = \mathbf{R}_j$ і $c = 1$) і підстановці в вирішальну статистику (15) максимально правдоподібних оцінок еталонів $\hat{\mathbf{S}}_i = K^{-1} \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_{i,k}$.

З огляду на те, що оцінки $\hat{\mathbf{S}}_i$ також розподілені по нормальному закону $\omega(\hat{\mathbf{S}}_i)$ з параметрами $\hat{\mathbf{S}}_i \sim (\mathbf{S}_i, K^{-1}\mathbf{R})$, то для визначення середнього і дисперсії вирішальної статистики необхідно усереднити (20) по спільній щільності розподілу $\omega(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_i)$ досліджуваної вибірки і цих оцінок. Тоді з урахуванням залежностей відстані Махаланобіса $u_{ij} = v(\hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_j)$ від оцінок еталонів визначаються середнє \bar{u}_{ij} і дисперсія вирішальної статистики

$$\bar{u}_{ij} = E\{u_{ij}(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_j)\} = \int \int \int (u_{ij}(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_j)) \omega(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_i) d\mathbf{Y} d\hat{\mathbf{S}}_i d\hat{\mathbf{S}}_j, \quad (21)$$

$$\sigma^2 = E\{(u_{ij} - \bar{u}_{ij})^2\} = \int \int \int (u_{ij}^2(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_j)) \omega(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{S}}_i, \hat{\mathbf{S}}_i) d\mathbf{Y} d\hat{\mathbf{S}}_i d\hat{\mathbf{S}}_j - \bar{u}_{ij}^2. \quad (22)$$

Після перетворень отримані: середнє, дисперсія вирішальної статистики та ймовірності помилок у вигляді

$$\bar{u}_{ij} = v_{ij} / 2; \quad \sigma^2 = \frac{N+2+K}{K} v_{ij} + \frac{2,5N}{K} + \frac{2N}{K^2} + \frac{N^2}{2K^2}; \quad P_{ij} = \text{erf}(\bar{u}_{ij}/\sigma). \quad (23)$$

Для аналізу ефективності розпізнавання на рис.4 побудовані графіки залежностей ймовірності помилки P_{ij} (23) від обсягу навчальної вибірки K при $v_{ij} = 10$. Аналіз показав, що приріст помилки $\delta p_{ij}(N, M, K) = p_{ij}(N, M, K) - p_{ij}(N, M)$ не перевищує на 0,05 потенційно досягну ймовірність, якщо обсяг навчальної вибірки $K > N$ не менше розміру вектора еталона, а при більш високих вимогах до точності розпізнавання, що відрізняється на 0,01 від потенційної, необхідно збільшити K в 4 рази. Для випадку некорельованих шумів $\mathbf{R} = \mathbf{I}_o$ досліджено вплив параметрів еталонів, таких як відношення сигнал/шум $q = \mathbf{S}_i^T \mathbf{S}_i = \mathbf{S}_j^T \mathbf{S}_j$ і близькість (кореляція) еталонів $r = \mathbf{S}_i^T \mathbf{S}_j / q$. Отримано розрахункові співвідношення

$$P_{ij} = \text{erf}\{(1-r)\sqrt{q} / [2(1-r) + 2/K + 2N/Kq]^{1/2}\} \quad (24)$$

і побудовані на рис.5 графіки залежностей ймовірності помилки від обсягу навчальної вибірки K для числа ознак $N=50$.

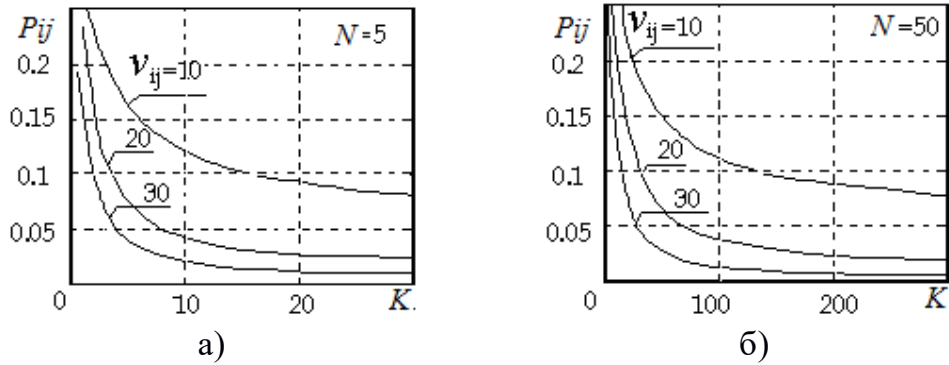


Рис. 4. Залежності ймовірності помилки p_{ij} від обсягу навчальної вибірки K : а) – $N=5$; б) – $N=50$

Виявлено, що близькість еталонів і зашумленість вибірок не тільки погіршують потенційну ефективність, але й суттєво уповільнюють збіжність помилки розпізнавання. Встановлення вимог до обсягу навчальної вибірки дозволяє удосконалювати ІТ побудови моделей класів з урахуванням близькості еталонів, рівня зашумленості вибірок, забезпечити контроль вірогідності прийнятих рішень.

Розроблено методики по створенню спрощених моделей об'єктів акустичного випромінювання та аналізу ефективності адаптивних АСР, призначених для звукоприймаючих систем виявлення і розпізнавання віддалених об'єктів ударного і вибухового типу на відстанях до десяти кілометрів. Відмова від побудови точних моделей пов'язана з труднощами обліку численних спотворень потужних звукових хвиль від імпульсних джерел, породжуваних короткочасними вітровими завадами, турбулентними і рефракційними ефектами атмосферного каналу поширення.

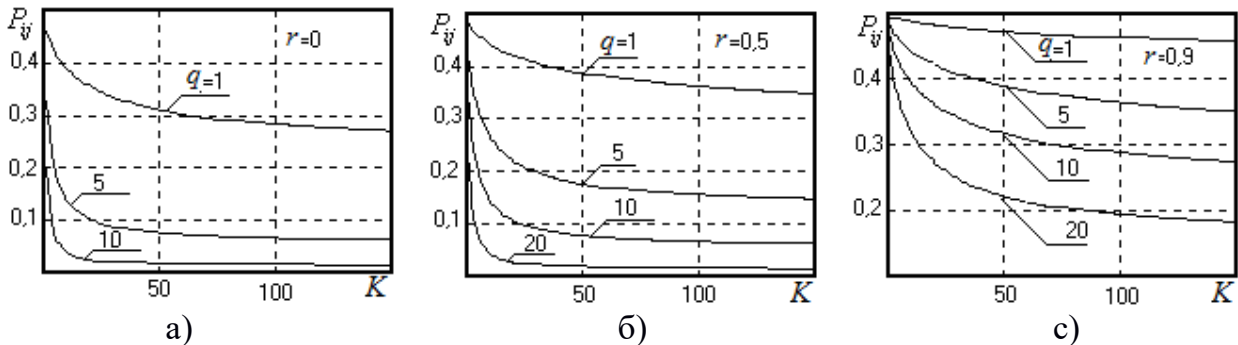


Рис. 5. Залежності ймовірності помилки p_{ij} від обсягу навчальної вибірки K з урахуванням зашумленості q і близькості класів: а) – $r=0$; б) – $r=0,5$; с) – $r=0,9$

Спрощення полягає в створенні статистичних еквівалентів класів сигналів і завад у вигляді аналітичних апроксимацій на основі аналізу експериментальних даних, які дозволяють проводити статистичне моделювання АСР. Для розрахунку завадостійкості визначені типові моделі завад, описувані в більшості випадків сукупністю резонансних, гауссових форм спектрів і окремих спектральних ліній. Дослідження структурних властивостей ковариаційних матриць еталонів показало, що низька кореляція ознак призводить матрицю до діагонального вигляду і

незначної відмінності елементів головної діагоналі. Це спростило розрахунок помилок розпізнавання на основі відстані між класами в вигляді $v_{ij} = (1 - r_{ij}) / (\sigma_i^2 + \sigma_j^2)$, що залежить від коефіцієнта кореляції між нормованими еталонами $r_{ij} = S_i^T S_j$ і дисперсій еталонів σ_i^2, σ_j^2 , пов'язаних з дальністю прийому D км наближеним виразом $\sigma^2(D) = \sigma_0^2(1 + 0,04D^2)$. Розрахунки ефективності за розробленою методикою $v_{ij}(D) = 0,5(1 - r_{ij}) / \sigma^2(D)$, $p_{ij} = \text{erf}\{0,5\sqrt{v_{ij}(D)}\}$ свідчать про прийнятну якість розпізнавання джерел акустичних випромінювань на дальностях до 6 км.

Для дослідження ефективності розпізнавання в умовах завад розроблена методика статистичного моделювання за експериментальними даними, що складається з аналізу спрощених моделей, потім розрахунку ефективності заводозахисту від короткочасних завад і ймовірностей помилок. Аналіз спектрально-кореляційних параметрів класів акустичних випромінювань і завад виявив їх відмінності, достатні для застосування адаптивних систем розпізнавання. Для аналізу $M=4$ класів об'єктів з розмірами еталонів в межах $N=30-50$ відліків використано понад $K > 10N > 500$ експериментальних реалізацій, що складаються з 1024 відліків, які містять суміш сигналів і завад. Отримано, що підвищення вірогідності розпізнавання в порівнянні з існуючими аналогами АСР забезпечується за рахунок застосування адаптивного придушення завад і накопичення сигналів. При цьому $\hat{W}_i = \hat{R}_D^{-1} S_i$, $i = \overline{1, M}$ підвищує середній виграш в с/з близько 10-13 дБ, а накопичення сигналів із застосуванням узгоджених фільтрів $W_i = S_i$ покращує с/з на 5-8 дБ.

Розроблено алгоритмічне забезпечення для ІТ класифікації сигналів і моделювання АСВ і АСР представлено на рис.6 послідовністю способів отримання інформаційних продуктів у вигляді моделей еталонних сигналів і завад, розрахунку їх ефективності по імовірнісним критеріям.



Рис.6. Інформаційна технологія моделювання АСВ і АСР

Розроблено методику імітаційного моделювання для дослідження імовірнісних характеристик адаптивної системи дальньої дії із застосуванням експериментальних реалізацій натурального моделювання класів ударних і вибухових механізмів. Показано, що в далекій зоні понад 12 км розпізнавання малоефективно через перекручування, породжуване рефракційними ефектами і атмосферною турбулентністю каналу поширення акустичної хвилі. IT є сукупністю методів і методик моделювання при підготовці первинної інформації в задачах виявлення і розпізнавання класів сигналів, оцінюванні вірогідності прийняття рішень в умовах короточасних завад.

У п'ятому розділі – "Синтез і аналіз адаптивних систем спільного виявлення та розпізнавання сигналів" проводиться дослідження адаптивних систем спільного виявлення і розпізнавання акустичних випромінювань для конкретних моделей сигналів.

Запропоновано метод синтезу багатоканальної системи для класів сигналів відомої форми $d_i(Y) = \max_{i \in 1..M} S_{0i}^T R_{II}^{-1} Y - 0,5 S_{0i}^T R_{II}^{-1} S_{0i} > c_i, i=1, M$ в умовах відсутності апріорної інформації про амплітудний множитель q еталонів $S_i = q S_{0i}$. Метод заснований на максимально правдоподібному оцінюванні амплітудного множника $\hat{q} = S_{0i}^T R_{II}^{-1} Y / S_{0i}^T R_{II}^{-1} S_{0i}$ шляхом вирішення рівнянь $\partial d_i / \partial \hat{q} = 0$. Це дозволило спростити вирішальну статистику $d_i(Y) = \max_{i \in 1..M} (W_i^T Y)^2 > c_i$, где

$W_i = R_{II}^{-1} S_{0i} / (S_{0i}^T R_{II}^{-1} S_{0i})^{0,5}$ задовольняє нормировці потужності завад (16). Така система має однакові пороги виявлення у всіх каналах $c_i = c$ і при наявності i -ого класу – відгук відповідного йому каналу $d_i(Y)$ є максимальним. Підвищення вірогідності прийняття рішень досягається за рахунок апріорної інформації про додатну амплітуду $q \geq 0$, що дозволяє усунути нелінійну операцію зведення в квадрат і привести статистику до вибору максимуму $d_i(Y) = \max_i S_i^T R_{II}^{-1} Y / (S_i^T R_{II}^{-1} S_i)^{0,5} > c$ з виходів лінійних виявлювачів.

Для класів випадкових гауссових процесів розроблена система виявлення і розпізнавання з урахуванням тимчасових обмежень на їх стаціонарність. Квазіоптимальна система виявлення-розпізнавання, побудована на решітчастій структурі (РС) $N-1$ -ого порядку, представлена на рис.7 і містить по $N-1$ вимірювачів коефіцієнтів відбиття, множників і суматорів. Ухвалення рішення проводиться після порівняння еталонних і вимірних коефіцієнтів відбиття вхідного процесу $x(t)$. Перевірка гіпотези H_i про наявність процесу з коефіцієнтами $\rho_1^i, \dots, \rho_{N-1}^i$ проти альтернативи H_0 про його відсутність (наявність завади з коефіцієнтами $\rho_1^0, \dots, \rho_{N-1}^0$) Здійснюється вирішальними статистиками виявлення і розпізнавання у вигляді

$$d_{обн}^j = \sum_{n=1}^{N-1} \text{sign}\{|\hat{\rho}_n - \rho_n^j| - c_n\} \geq 0; \quad d_{расн} = \min_{j \in M} \sum_{i=1}^{N-1} \text{sign}\{|\hat{\rho}_i - \rho_i^j| - c_i^j\}, \quad (25)$$

$$d_{обн-расн} = \begin{cases} j, & \text{при } d_{расн} = j, d_{j,обн} > 0 \\ 0, & d_{расн} = j, d_{j,обн} = 0 \end{cases} \quad (26)$$

при порогових значеннях c_1, \dots, c_{N-1} кожної ступені РС. Так як оцінювання параметрів вхідного процесу здійснюється на одній решітчастій структурі, то для кожного додаткового класу розпізнавання досить додати лише N логічних операцій порівняння, що не вимагає істотного збільшення обчислювальних витрат.

Запропоновано методика аналізу імовірнісних характеристик з урахуванням розміру і числа векторів досліджуваних вибірок, в якій для коефіцієнтів відбиття застосовані вибіркові оцінки коефіцієнтів кореляції з щільністю розподілу ймовірностей $\omega(\hat{\rho}_n^0), \omega(\hat{\rho}_n^1)$.

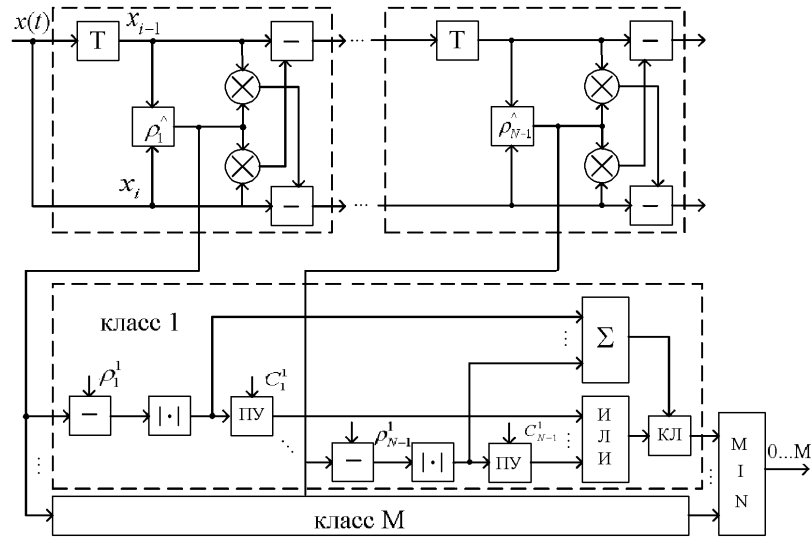


Рис.7. Система виявлення-розпізнавання випадкових процесів

При цьому ймовірності помилкової тривоги F_n і правильного виявлення D_n кожної n -ої ступені РС і результуючі F і D визначаються виразами:

$$F_n = 1 - \int_{-c_n}^{c_n} \omega(\hat{\rho}_n^0) d\hat{\rho}_n^0, \quad D_n = 1 - \int_{-c_n}^{c_n} \omega(\hat{\rho}_n^1) d\hat{\rho}_n^1, \quad (27)$$

$$F = 1 - \prod_{n=1}^{N-1} (1 - F_n), \quad D = 1 - \prod_{n=1}^{N-1} (1 - D_n). \quad (28)$$

Показано, що для навчальної вибірки $K > 4N$ і відмінності коефіцієнтів кореляції на 0,35 і більше, досягається ефективне виявлення і розпізнавання випадкових процесів з невеликими інтервалами стаціонарності.

Розроблення адаптивних систем спільного виявлення і розпізнавання дозволило розвинути критерії синтезу і методи аналізу ефективності комбінованих систем, побудованих на одноканальних адаптивних системах виявлення.

У шостому розділі – "Обчислювальні методи побудови та аналізу цифрових систем адаптивного оброблення сигналів" розроблені методи побудови вискоефективних архітектур і визначення необхідної розрядності цифрових АСВ із застосуванням безпосереднього звернення вибіркових ковариаційних матриць і на базі решітчастих структур.

Отримав подальший розвиток метод побудови високоефективних архітектур із застосуванням решітчастих структур для реалізації синтезованих АСВ. Метод заснований на використанні інформаційної надмірності параметрів ковариаційної матриці тепліцевої форми. Це дозволяє спростити операцію її обігу шляхом побудови обчислювального процесу на основі решітчастих структур (РС).

Розроблена реалізація АСВ (11) на РС, наведена на рис.8а в разі $M=2$ обмежень $V^T = (S_{01}, S_{02}, \dots, S_{0M})$ і $U^T = (1, 0)$, де вектор S_0 визначає точку придушення дискретної короткочасної завади.

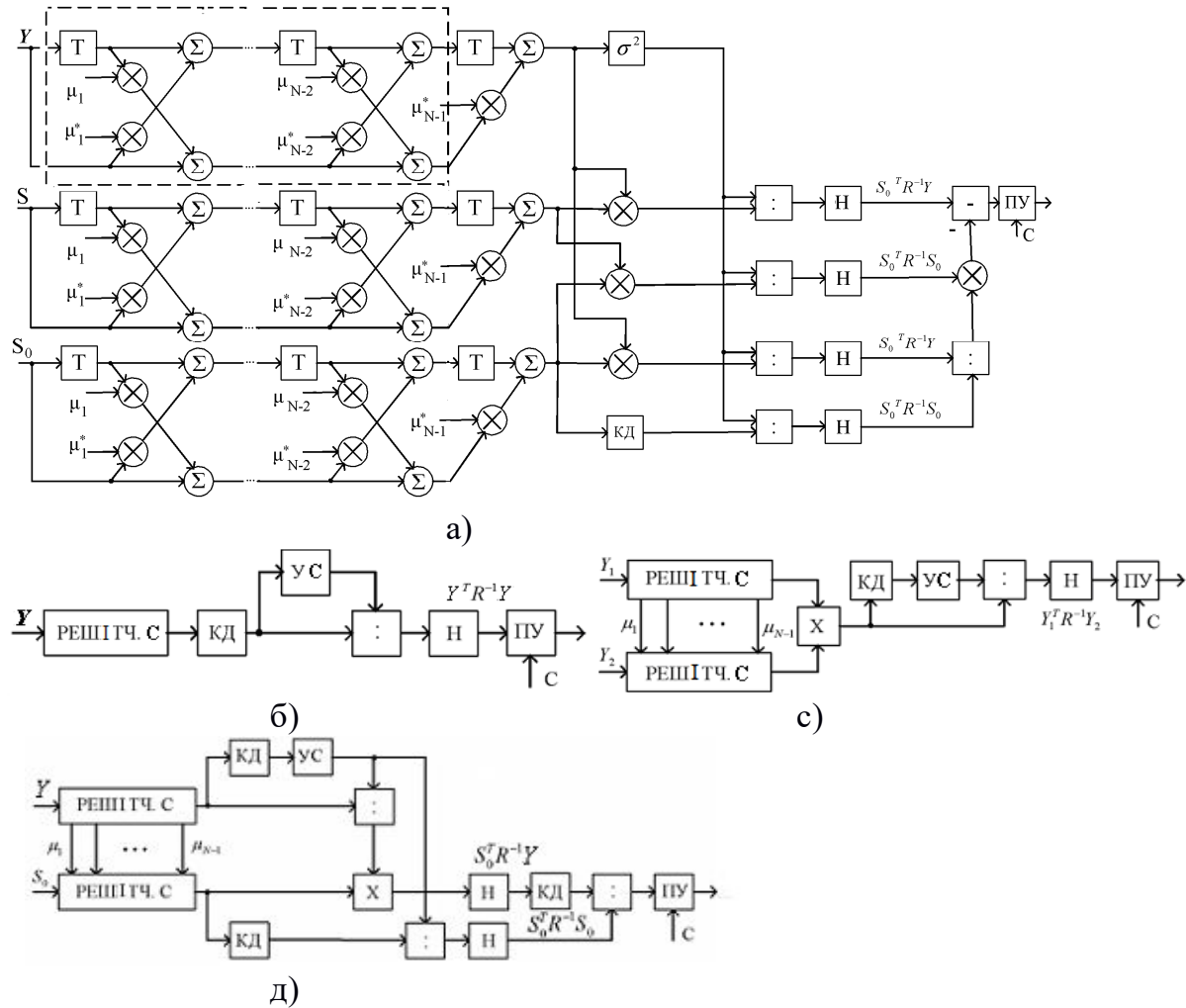


Рис. 8. Архітектури систем адаптивних систем виявлення: а) – сигналів відомої форми з 2-ома лінійними обмеженнями на ваговий вектор; б) – сигналу невідомої форми; с) – випадкових сигналів на основі двоканального кореляційного оброблення; д) – сигналів відомої форми інваріантною системою з нормуванням потужності завад

Адаптація системи полягає в оцінюванні вагових коефіцієнтів $\hat{\mu}_n, n = \overline{1, N-1}$ по вхідному процесу X в одній РС, які підставляються в інші РС із зразками S, S_0 . При цьому обчислювальні витрати на навчання практично не залежать від обмежень, а витрати на оброблення зростають пропорційно числу обмежень. Складено схеми

ряду АСВ: для квадратичних вирішальних статистик на основі тесту Хотеллінга $d = \mathbf{Y}^T \mathbf{R}_{II}^{-1} \mathbf{Y} > c$ (Рис.8б) і двоканального кореляційного оброблення $d = \mathbf{Y}_1^T \mathbf{R}_{II}^{-1} \mathbf{Y}_2 > c$ (Рис.8с), для виявлення з нормуванням потужності завод (Рис.8д), де $(:)$ - дільник, H - накопичувач відліків, КД- квадратор і УС- усереднюючий фільтр, ПУ - пристрій управління порогом.

З аналізу обчислювальних витрат для представлених архітектур виходить, що вирішальні статистики, які використовують еталони відомої форми, приблизно однакові за складністю, пропорційної розміру РС, і розрізняються лише на кілька дільників, накопичувачів і квадраторов. Витрати на реалізацію виявителя на основі тесту Хотеллінга приблизно в 2 рази менше в порівнянні з виявителем сигналів відомої форми.

До цифрових систем, що використовують оцінювання та звернення ковариаційної матриці завод, пред'являються підвищені вимоги до помилок, внесених кінцевою розрядністю. Запропоновано метод аналітичного розрахунку розрядності вхідних даних при гарантованому рівні втрат в ефективності адаптивних систем. Досліджено модель квантування навчальних вибірок в припущенні, що крок квантування на багато менше середньоквадратичного значення вхідного процесу. З огляду на те, що при цьому практично відсутня взаємна кореляція між шумом квантування V і вхідним процесом X , то шум квантування є дискретним білим шумом з дисперсією $\sigma_k^2 = 2^{-2B} / 3$ в разі B двійкових розрядів, а ковариаційна матриця заводи після АЦП і її оцінка мають вигляд

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{II} + \sigma_k^2 \mathbf{I}_0; \quad \hat{\mathbf{R}} = K^{-1} \sum_{i=1}^K (\mathbf{X}_i + \mathbf{V}_i)(\mathbf{X}_i + \mathbf{V}_i)^T; \quad \overline{\mathbf{V}\mathbf{V}^T} = \sigma_k^2 \mathbf{I}_0. \quad (29)$$

після підстановки $\hat{\mathbf{R}}$ (29) в оцінку вагового вектора (9), потім усереднений по щільностям розподілів c/z ρ і потужності завод η аналогічно (14), отримано аналітичні вирази для втрат, зумовлених квантуванням, в придушенні завод η і в c/z μ для статистик (9), (11) та (16). Втрати не залежать від обсягу навчальної вибірки K , а визначаються тільки параметрами сигнально-заводових обставин \mathbf{S} , \mathbf{R}_{II} у вигляді співвідношень

$$\eta = [(\mathbf{S}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S})^{-1} - \sigma_k^2 \mathbf{S}^T \mathbf{R}^{-2} \mathbf{S} / (\mathbf{S}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S})^2] \mathbf{S}^T \mathbf{R}_{II}^{-1} \mathbf{S}, \quad \mu = \eta^{-1}. \quad (30)$$

Проведено розрахунки і побудовані графіки (Рис.9) для визначення розрядності, що забезпечує 3 дБ втрати через квантування, при різних вимогах до коефіцієнта придушення завод, що задається вхідним відношенням завода/шум q_n . Штриховою лінією наведені результати імітаційного моделювання з програмним урізанням розрядної сітки. Досліджувалися випадки однієї заводи і усередненої заводової обстановки в вигляді $N-1$ завод, рівномірно розташованих по всій смузі. Аналіз (22) показав, що найбільш чутливими до розрядності є ситуації, в яких необхідно забезпечити найбільший коефіцієнт придушення завод. Встановлено, що з

підвищенням вимог до придушення завад на 20 дБ необхідно збільшувати розрядність приблизно на 8 біт.

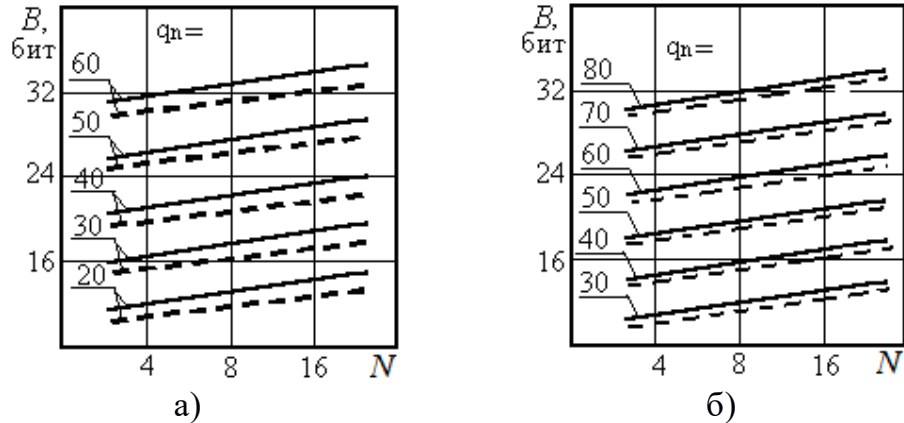


Рис. 9. Графіки залежностей необхідної розрядності B від розміру системи N для заводових ситуацій: а) – одна завада; б) – $N-1$ завод

Розроблено аналітичні вирази для розрахунку втрат через кінцеві розрядності для каскадної побудови АСВ на РС, що містять $N-1$ ступенів для придушення завод. Враховано особливість, що на кожному наступному ступені зменшується різниця між кроком квантування і середнім рівнем завод, що не придушені. У зв'язку з цим, модель квантування побудована з урахуванням взаємної кореляції шумів квантування і досліджуваного процесу.

Визначено розрахункові співвідношення для обчислення ймовірностей D, F помилок виявлення від параметрів: розрядності B ; коефіцієнта G придушення завод; першого коефіцієнта ρ_1 кореляції завади; втрат ΔG в придушенні завод і діапазону D можливих відносин сигнал/шум

$$G = 1 / \prod_{i=1}^{N-1} (1 - \rho_1^{2^i}); \Delta G = \prod_{i=1}^{N-1} \left(1 + \frac{2 \cdot 2^{-B}}{1 - \rho_1^{2^i}} \right) \left(1 + \frac{D 2^{-B} (1 + \rho_1^i)^2}{1 - \rho_1^{2^i}} \right); D = (-2 + 2 \ln F / \ln D)^{0,5}. \quad (31)$$

Аналіз розрахунків по (30) і (31) показав, що застосування РС дозволяє знизити вимоги до розрядності в порівнянні з безпосереднім зверненням ковариаційної матриці. У разі 14-розрядного квантування втрати не перевищують 2 дБ, забезпечуючи усунення завод до 70 дБ. Запропоновані методи аналітичного моделювання цифрових адаптивних систем АСВ на решітчастих структурах дозволяють зробити обґрунтований вибір параметрів АСВ за сукупністю критеріїв вірогідності і обмежень на обчислювальні ресурси.

У цьому розділі – "Розроблення програмно-апаратного забезпечення стендів адаптивних систем локації" наведені результати експериментальних досліджень і застосування програмного забезпечення ІТ для моделювання АСВ, АСР в задачах радіолокації, гідролокації і пасивної акустичної локації для моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки.

Програмно-апаратні засоби оброблення інформації засновані на методах, методиках натурального і математичного моделювання, розроблених в попередніх розділах. Призначені для вдосконалення моделей сигналів і завад, підвищення вірогідності рішень АСВ і АСР, оцінки їх ефективності, вироблення рекомендацій щодо коригування параметрів систем і правил прийняття рішень. Бази даних формуються з датчиків зон контролю і складаються з класифікованих реалізацій, що містять сигнали і завади з істотною просторово - тимчасовою неоднорідністю, упорядкованих за індексами полів, що містять клас об'єкта, дальність знімання інформації, час отримання даних, погодні умови (температура повітря, хвилювання моря, швидкість вітру). Оцінка ефективності розроблених систем здійснюється шляхом аналітичного розрахунку і імітаційного моделювання відповідно до мети, що задається оператором за допомогою призначеного для користувача інтерфейсу. Результати імітаційного моделювання АСВ і АСР представлені на рис.10 для сигнально-завадової ситуації, що містить швидкісний катер і непорушне судно на фоні короткочасних завад від морської поверхні при похмурій погоді. Вірогідність виявлення (Рис.10б) показана легендою кольору для ймовірності правильного виявлення, а розпізнані АСР мети позначені відповідними знаками легенди (Рис.10в).

Проведено аналіз тимчасових реалізацій класів сигналів, що приймаються системами пасивної акустичної локації дальньої дії (рис.11). Аналіз показав, що різниця діапазонів частот і форм спектрів короткочасних завад та сигналів забезпечує розпізнавання класів об'єктів випромінювання імпульсних акустичних хвиль на відстанях до 5-10 км і виявлення до 10 і більше км.

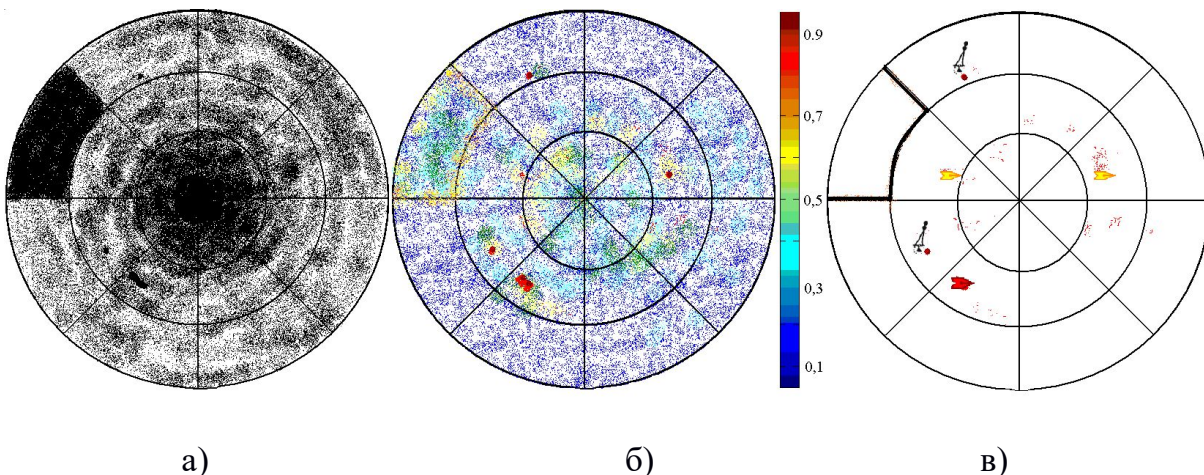


Рис. 10. Типові кадри імітації сигнально-завадової обстановки на індикаторі кругового огляду: а) – традиційне оброблення без завадозахисту; б) –з застосуванням адаптивного завадозахисту; в) –із застосуванням системи розпізнавання.

Застосування ІТ дозволило підвищити вірогідність рішень системи звукопеленгації дальньої дії за рахунок вибору застосування адаптивного оброблення для компенсації короткочасних атмосферних завад на 6-12 дБ, що забезпечило збільшення в 1,5 рази розмір контрольованої зони при збереженні заданих помилок прийняття рішень. Розроблена гібридна система середнього

радіусу дії на основі принципів пасивної звуколокації і сейсмолокації імпульсних та безперервних сигналів, яка призначена для охорони важливих об'єктів. Застосування адаптивних алгоритмів багатоканального кореляційного оброблення дозволило збільшити дальність виявлення більш ніж в 1,5 рази в порівнянні з відомими системами: розпізнавати і визначати координати кроків порушників, ударів механізмів, руху колісного і гусеничного транспорту, польоту повітряного транспорту і безпілотних літальних апаратів (БПЛА) по звуку гвинтів і двигуна.

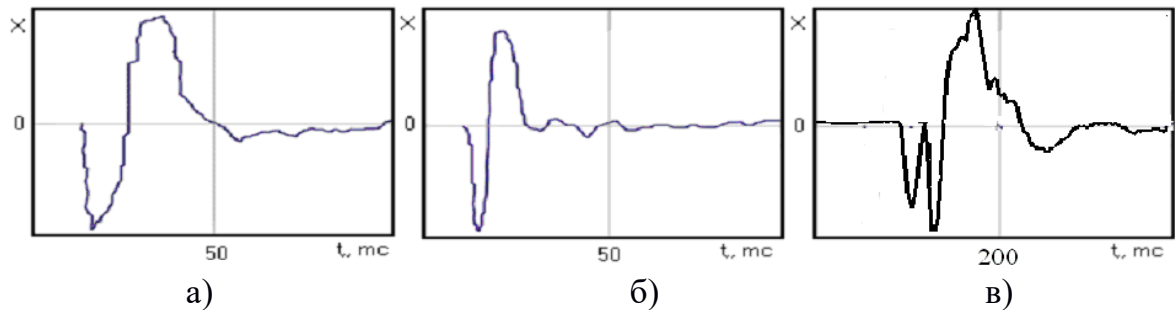


Рис.11. Сигнали різних класів: а) –1 класу; б) –2 класу; с) –3 класу;

На рис. 12 наведені візуалізації траєкторії руху БПЛА (3D-просторі, полярній системі координат і висотоміра) при співвідношенні сигнал/завада, що дорівнює 3 і 0,5. Рух цілі проводився на висоті 10 метрів зі швидкістю 15 м/с по прямій лінії у системі координат $x=[-40; 40]$, $y=20$ метрів від центру решітки з 5-ти датчиків.

Аналіз показав, що при співвідношенні сигнал/ завада, що дорівнює 3, СКВ оцінки визначення координат не перевищує 1 метра. Зі зменшенням сигнал/шум < 1 СКВ зростає до 4 метрів і мають місце хибні цілі (через викривлення піків ВФН і, внаслідок цього, переплутування бічного й головного піків), що призводить до істотних похибок визначення координат.

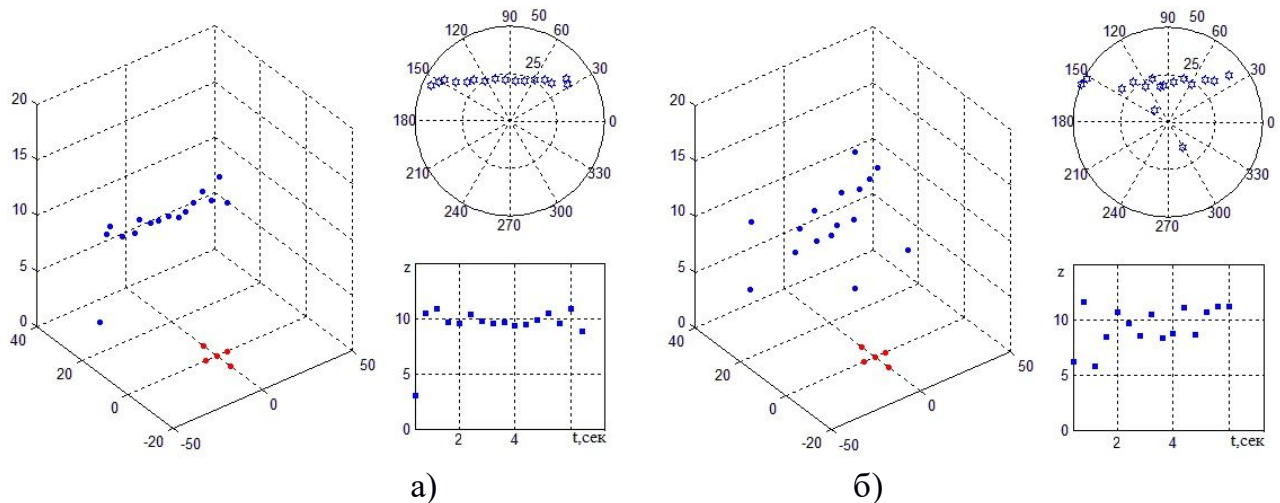


Рис. 12. Візуалізація траєкторії руху цілі в 3D координатах, полярній системі координат и висотоміра при різном співвідношенні сигнал/завада:

а) – $c/z=3$; б) – $c/z=0,5$

Дослідження проводилися на стенді, який призначений для установки на пересувний транспорт і містить 5 мікрофонів, що розташовані по кутам квадрату та його центру (сторона квадрату становить 3 м). Встановлено, що в денний час доби у відкритому просторі та безвітряну погоду людина чує малий БпЛА з електродвигуном на відстані до 20 метрів, а звуколокаційна система – до 70 метрів. Середні БпЛА вагою 0,5 кг виявляються на дистанції до 700 метрів, а вагою 2,5 кг - до 3000 метрів в "чистому полі". У нічний час доби дальність вірогідної локації збільшується в кілька разів. Встановлено, що для контрольованої зони 500 м похибка оцінки визначення координат рухомого джерела звуку може досягати до 10 метрів. Похибки у координатах нерухомих джерел приблизно в 2 рази менші у порівнянні з рухомими. Практично цього достатньо для подальшого супроводу цілі засобами відеомоніторингу.

Завданнями сейсмолокації при моніторингу контрольованої зони є виявлення і визначення координат кроків людини, підкопів (імпульсні сигнали), розпізнавання виду транспорту, що рухається: колісний і гусеничний (безперервні сигнали). Короткочасними завадами є рух коренів дерев від вітру. Для збільшення розміру контрольованої зони необхідно збільшувати число датчиків або застосовувати датчики високої чутливості. Проте недоліком датчиків високої чутливості є велика тривалість перехідних процесів (понад 1-2 сек.), тому сигнали мають велику тривалість і кроки людини зливаються. Рішення – кореляційне оброблення з пари близько розташованих датчиків, а також вибір сучасних мікроелектромеханічних 24-розрядних датчиків з тривалістю перехідних процесів менш 0.5 сек. На рис. 13 наведені записи ударів об ґрунт (кроків людини) після кореляційного оброблення на різних дистанціях, від 10 до 120 метрів.

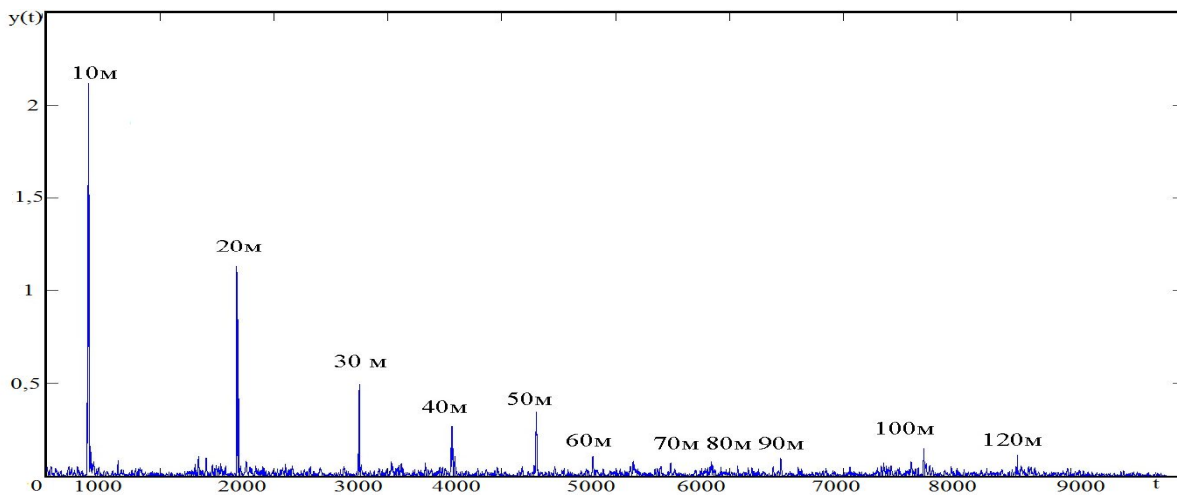


Рис. 13. Записи кроків після кореляційного оброблення

Як видно, надійне виявлення пішоходів можливо в радіусі до 50 метрів. Це дозволило виявляти кроки окремо, визначати траєкторію пішохода в зоні до 50 метрів, що перевищує в 2 рази характеристики кращих відомих систем.

Завдання розпізнавання полягає в поділі ознак кроків людини, підкопів (імпульсні сигнали з з різним періодом і зміни координат переміщення кроків), виду

транспорту, що рухається: колісного і гусеничного. Безперервні сигнали колісного і гусеничного транспорту розрізняються по спектру: удари лопаток гусеничного транспорту вносять додаткові гармоніки в спектр сигналу.

Досліджено можливості пасивних систем локації ближньої дії, призначених для моніторингу стану трубопроводів високого тиску. Визначено характеристики акустичної системи ближньої дії, призначеної для виявлення і локалізації ушкоджень трубопроводів парогенератора енергетичної установки в умовах завад від роботи оточуючих механізмів. Система виявлення звуку, породжуваного течами пара з пошкоджень, дозволяє визначити місце пошкодження з точністю 10 см в круговій зоні до 6 метрів, що задовольняє вимогам оперативних ремонтних робіт.

Для перевірки герметичності підводних транспортних трубопроводів розроблена система пасивної локації ближньої дії на основі аналізу гідроакустичних сигналів, породжуваних бульбашками газів з мікротріщин стінок труб. З метою ефективного виділення сигналів на фоні завад, що виникають при роботі оточуючих механізмів, розроблені моделі сигналів і алгоритми завадозахисту. При натурному моделюванні дефектів труб встановлено, що потік сигналів $s(t)$ має імпульсний характер з випадковим періодом повторення (Рис.14), що переходить в квазінеперервний процес при великій течі. Аналіз експериментальних даних натурального макета дозволив врахувати відмінність спектрів сигналів $P(f)$ (Рис.15) і особливості короточасних завад, створюваних різними механізмами, що знаходяться в оточенні, ударні впливи і вібрації яких змінюються з плином часу.

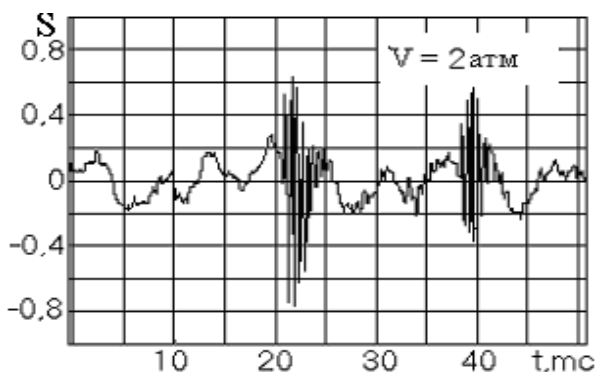


Рис.14. Суміш сигналу з завадою

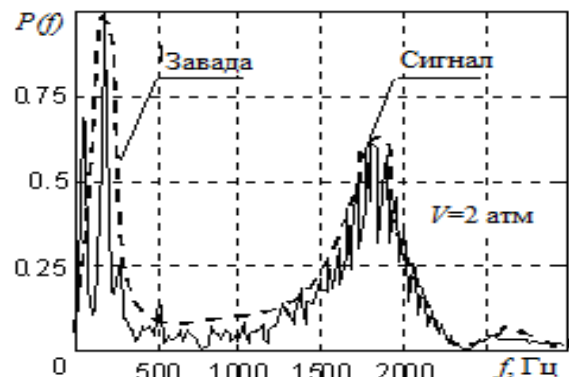


Рис.15. Спектр сигналу з завадою

Аналіз параметрів акустичних випромінювань для різних розмірів ушкоджень показав, що найбільш прийнятними параметрами оцінки течі є центральна частота і ширина спектра. Аналіз залежностей середньої частоти f_0 , ширини спектра Δf і c/λ від тиску V газів і розмірів щілини в діапазоні 20 ... 80 мкм показав, що ці параметри є стійкими монотонними функціями витрати течі, близькими до лінійних, а рівень c/λ достатній для виявлення. Встановлено, що діапазон частот акустичних завад, викликаних роботою оточуючих механізмів, незначно перекривається зі спектрами сигналів. Система виявлення-вимірювання течі з адаптивним придушенням завад реалізована на статистиці Хотеллінга у вигляді решітчастої структури (Рис.16) з наступними характеристиками: число каналів $M=4$, число вимірюваних коефіцієнтів відбиття $N-1=4$, обсяг навчальної вибірки $K = 4N=20$,

розрядність 14 біт. За коефіцієнтами відображення РС визначаються параметри спектра, що служать для непрямого вимірювання витрати течі при контролі герметичності труб.

Підвищення вірогідності виявлення досягається вибором параметрів адаптивного компенсатора завад відповідно до теоретичних результатів, що дозволило придушити короточасні завади практично до рівня шумів акустичного приймача.

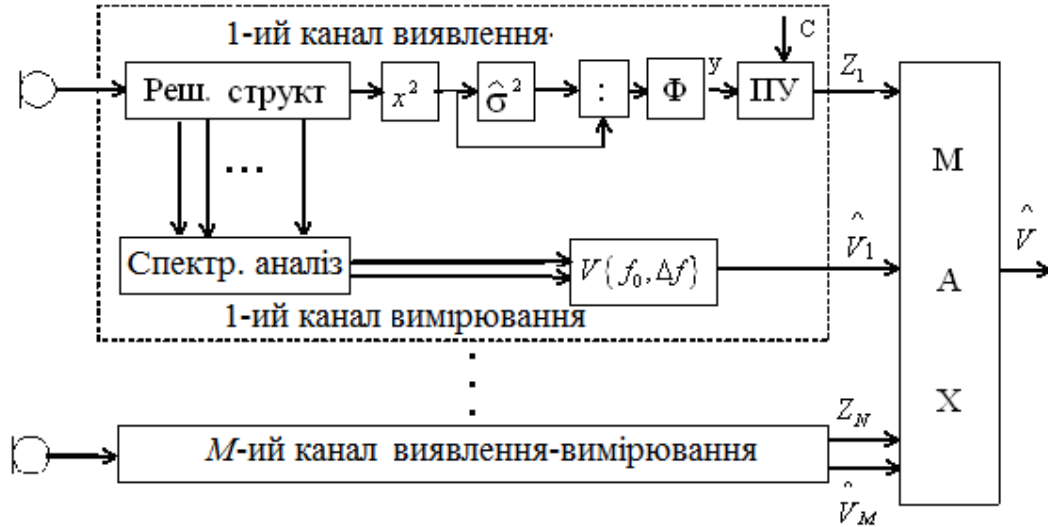


Рис.16 Адаптивна система виявлення-вимірювання течі

Розглянутий підхід до побудови АСВ, АСР і їх застосування в задачах локації, звукопеленгації і моніторингу зони охорони важливих об'єктів забезпечує подальший розвиток ІТ для проектування програмно-апаратних комплексів імітаційного і натурного моделювання об'єктів в умовах короточасних завад.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема розвитку теорії і техніки створення адаптивних систем спостереження за фізичними процесами для підвищення якісних характеристик локаційних систем виявлення і розпізнавання сигналів в умовах короточасних завад різного походження при обмежених обчислювальних ресурсах.

Відповідно до поставленої мети розвинені методи аналізу, синтезу та оптимізації для функціонального і структурного вдосконалення вищевказаних систем.

1. Вперше запропоновано науково-методологічний підхід до забезпечення контролю вірогідності виявлення і розпізнавання при розробці адаптивних систем, який полягає в декомпозиції системних перетворень по помилках, внесених обмеженнями: на час спостереження сигналів і короточасних завад, на розрядність і обсяг обчислювальних ресурсів. Це досягнуто вибором черговості етапів синтезу, аналізу і оптимізації зазначених систем в порядку зростання апріорної невизначеності щодо параметрів моделей сигналів, що дозволило комплексувати

системи виявлення і розпізнавання, досліджувати вплив істотних параметрів на тривалість адаптації.

2. Запропоновано методи синтезу і оптимізації ряду АСВ сигналів у часовій і спектральній області, що забезпечило інваріантність ймовірності помилкової тривоги до параметрів завадових обставин шляхом нормування потужності завад в адаптивному режимі. При цьому вихідний процес АСВ відповідає відношенню сигнал/завада, що дозволяє здійснити в реальному часі контроль вірогідності виявлення сигналів на фоні короткочасних завад зі змінними параметрами.

3. Вперше запропоновано метод аналізу вірогідності виявлення. Для ряду оптимізованих АСВ отримані аналітичні розрахункові співвідношення для вірогідності помилок виявлення тільки від відносин сигнал/завада і обсягу навчальної вибірки короткочасних завад. Встановлено рекомендації по вибору ймовірності помилкової тривоги, що задається в межах від $F = 10^{-4}$ до $F = 10^{-8}$, в залежності від обсягу навчальної вибірки, які неможливо було прогнозувати по існуючих енергетичних критеріях: сигнал/завада і потужності завад. Показано, що за імовірнісним критерієм пред'являються більш жорсткі вимоги до обсягу навчальної вибірки, що визначаються зі співвідношення $K > 3N$ між числом і розміром векторів навчальної вибірки, на відміну від межі $K > 2N$ – відомого для енергетичних критеріїв.

4. Вперше запропоновано метод аналізу вірогідності розпізнавання сигналів, що враховує похибки вибірових оцінок векторів середніх значень нормального процесу. На відміну від відомих, отримані аналітичні залежності ймовірності помилки розпізнавання від числа K векторів навчальної вибірки, відстані Махаланобіса, відносин сигнал / завада і числа N інформативних ознак. Аналіз показав, що відмінність ймовірності помилки розпізнавання на 0,05 від потенційно досяжною забезпечується при обсязі навчальної вибірки $K > N$, а для зменшення відмінності до 0,01 необхідно збільшити число векторів K практично в 4 рази.

5. Удосконалено метод аналізу втрат, що виникають в цифрових системах через кінцеві розрядності, що дозволив провести аналітичні розрахунки ефективності цифрових АСВ по імовірнісним критеріям. Встановлено, що для прямих методів адаптації з безпосереднім зверненням ковариаційної матриці завад спрощується розрахунок втрат, пов'язаних з розрядністю, тому що втрати не залежать від числа навчальних вибірок. Це дозволяє досліджувати втрати за енергетичними критеріями сигнал/завада і завада/шум. Показано, що в системах зі зверненням ковариаційної матриці пред'являються великі вимоги до розрядності і необхідно збільшувати розрядність на 8 біт при кожному підвищенні відносин завада / шум на 20 дБ. У АСВ на решітчастих структурах достатньо 14 біт в діапазоні відносин завада/шум до 70 дБ.

6. Розвинені критерії та методи синтезу багатоканальних систем спільного виявлення і розпізнавання імпульсних сигналів, що дозволило спростити проектування шляхом вибору однакових порогових рівнів в каналах виявлення, забезпечити інваріантність порогів до параметрів еталонних сигналів і короткочасних завад. Для безперервних процесів з обмеженими інтервалами стаціонарності запропонована квазіоптимальна система виявлення і розпізнавання

на решітчастої структурі, що містить N каскадів оцінювання параметрів розпізнавання процесів. Прийняття рішень засноване на порівнянні з порогами коефіцієнтів кореляції, які оцінюються за навчальною вибіркою в каскадах РС. Аналітичний розрахунок ймовірностей помилок дозволив встановити вимоги до обсягу навчальної вибірки, який при $K > 4N$ каскадів решітчастої структури достатній для розпізнавання випадкових процесів, що розрізняються коефіцієнтами кореляції на 0,35 і більше.

7. Розвинуто метод розроблення високоефективних архітектур досліджених адаптивних систем на решітчастих структурах. Показано, що обсяг обчислювальних витрат, який пропорційний N^2 операцій додавання і множення для відомих рішень, зменшений в N раз для розроблених адаптивних систем. Подальше зниження витрат можливе для моделей завад, описуваних авторегресією порядку меншого N .

8. Набуло подальшого розвитку алгоритмічне забезпечення ІТ класифікації сигналів шляхом оброблення експериментальних даних, що дозволило створити класи сигналів і короткочасних завад, знизити середньоквадратичне помилку оцінок еталонів на 15% за рахунок бракування малоінформативних образів. Розроблено методики наближеного розрахунку імовірнісних характеристик з урахуванням різних апроксимацій моделей сигналів, які не виявили значних розбіжностей з розрахунками за експериментальними даними і підтвердили адекватність прийнятих положень.

9. Розроблено програмно-апаратні комплекси для проведення аналітичного, імітаційного і натурального моделювання РЛС, звуколокації об'єктів акустичного випромінювання, сейсмолокації і гідролокації. При цьому автоматизовані процеси оброблення експериментальних даних, оптимізовані параметри еталонних сигналів і адаптивного оброблення. Це забезпечило задану ймовірність виявлення і розпізнавання віддалених об'єктів акустичного випромінювання в зоні контролю до 10-15 км, що в 1,5 рази більше в порівнянні з відомими системами. Підвищено стійкість системи контролю підводних трубопроводів на основі реєстрації ушкоджень акустичними методами бульбашок газів, що стікають через мікротріщини стінок. Розроблена адаптивна система на решітчастій структурі для виявлення пошкоджень з розмірами більше 20 мкм, вимірювання витрати течі і придушення короткочасних завад практично до рівня власних шумів датчиків системи.

Запропоновані методи розвивають наукову методологію синтезу, аналізу та оптимізації систем адаптивного виявлення і розпізнавання, що дозволяє в короткі терміни і з малими витратами забезпечити розроблення простих в реалізації програмно-апаратних комплексів, які мають контроль вірогідності прийнятих рішень і ефективність, близьку до потенційно досяжної.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Болтенков В.А., Верпета В.І., Максимов М.В., Орлов В.В. Розробка моделі акустичної системи виявлення течій у трубопроводах. *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси і системи. Межвузовський журнал*. Херсон. № 1(6). 2000. С. 11-16.
2. Орлов В.В., Галченков О.Н. Алгоритми спектрально-корреляційної обробки широкополосних сигналів. *Електроніка і зв'язь*. Київ:, 2000. т.2. № 8. С. 287-290.
3. Орлов В.В. Вероятностные характеристики адаптивных фильтров. *Труды Одес. политехн. ун - та*. Одесса.. 2002. Вып.1 (17). С.153-156.
4. Орлов В.В. Экономичный фильтр компенсации помех на основе алгоритма Фроста. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2002. №1. С.79-84.
5. Орлов В.В. Формирование образов при распознавании источников импульсных акустических сигналов. *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*. 2002. № 1. С. 25-29.
6. Орлов В.В. Обнаружение и распознавание импульсных акустических сигналов. *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси і системи. Межвузовський журнал*. Херсон. 2002. №1(10). С. 34-36.
7. Орлов В.В. Построение эталонов для классификации источников импульсных акустических сигналов. *Праці УНДІРТ*. Одесса. № 1(29). 2002. С. 22-25.
8. Орлов В.В. Эффективность обучения системы распознавания неисправностей механизмов по излучению импульсных акустических сигналов. *Автоматизація судових технічних средств: Научно-техн. сборник*. Вып.7 Одесса: ОГМА. 2002. С. 109-114.
9. Орлов В.В. Анализ эффективности системы совместного обнаружения и распознавания импульсных акустических сигналов. *Праці УНДІРТ*. 2002. № 4(32). С. 72-79.
10. Орлов В.В. Оценка мощности случайного сигнала на основе корреляционной пространственной обработки. *Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси і системи. Межвузовський журнал*. Херсон.: 2003. № 1(11). С. 66-70.
11. Орлов В.В., Ситников В.С. Оптимизация цифрового адаптивного фильтра по критерию точность-быстродействие. *Електромашинобудування та електрообладнання*. Київ : Техніка. 2003. Вип.61. С. 87-103.
12. Орлов В.В. Обнаружение местоположения источника излучения на основе корреляционной пространственной обработки. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2003. № 2. С. 42-46. (WEB of Science, Index Copernicus)
13. Орлов В.В. Эффективность распознавания импульсных сигналов при обучении по классифицированным выборкам. *Труды ОНПУ*. Одесса. 2004. Вып. 1(21). С. 125-128.
14. Орлов В.В. Алгоритмы временной обработки при пассивной звуколокации импульсных сигналов на фоне атмосферных помех. *Праці УНДІРТ*. 2004. № 1(37). С. 56-59.

15. Орлов В.В. Эффективность адаптивных фильтров при расстройке принимаемого и опорных сигналов. *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский журнал*. Херсон.: 2003. № 2(12). С. 89-94.
16. Орлов В.В. Ймовірнісні характеристики оцінок спектральної потужності. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. -Вип. 1(28). -2004. С.138-140.
17. Орлов В.В., Пенкова А.В. Погрешности квантования обучающих выборок при адаптации цифровых фильтров компенсации помех. *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*. 2004. № 1. С. 67-72. (BASE, Crossref, Citefactor, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat)
18. Орлов В.В. Экономичные квадратичные фильтры компенсации помех. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2004. № 1. С. 71-75.
19. Орлов В.В. Экономичная реализация обнаружителей сигналов на основе решетчатых фильтров. *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский журнал*. Херсон. 2004. № 2(14). С. 208-213.
20. Орлов В.В., Положаенко С.А. Вероятностные характеристики адаптивного алгоритма компенсации помех при дополнительных линейных ограничениях. *Электронное моделирование*. 2004. № 6. С.113-119. (Cambridge Scientific Abstracts, Index Copernicus, Inspec, Ulrich's Periodicals Directory)
21. Орлов В.В., Гаращук В.В. Эффективность распознавания классов источников акустических импульсных сигналов. *Новые технологии*. Кременчук. 2004. №3(6). С. 110-113.
22. Орлов В.В., Положаенко С.А. Математическая модель и защита от помех обнаружителя акустических сигналов, порожденных истечением газа в жидкости. *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*. 2004. №3. С. 39-47. (BASE, Crossref, Citefactor, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.)
23. Орлов В.В., Дмитриева Н.О. Квазиоптимальный обнаружитель - распознаватель стационарных случайных процессов на решетчатой структуре. *Вестник СевНТУ. Серия «Автоматизация процессов и управление»*. Севастополь. 2004. Вып.58. С. 22-28.
24. Орлов В.В. Стабилизация уровня ложных тревог адаптивного обнаружителя с нормировкой мощности помех. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2004. №2. С.32-36.
25. Орлов В.В. Обнаружение и распознавание стационарных случайных процессов на решетчатой структуре. *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский журнал*. Херсон. 2004. № 1(13). С. 33–38.
26. Орлов В.В. Двухэтапный алгоритм обнаружения сигнала в условиях неклассифицированной обучающей выборки. *Праці УНДІРТ*. 2004. № 2(38). С50-53.
27. Орлов В.В., Коваленко А.Ю. Моделирование конфигурации сети датчиков для устранения неоднозначности определения координат в пассивной локации. *Электронное моделирование*. 2010. № 2. С. 107-115. (Cambridge Scientific Abstracts, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory.)
28. Орлов В.В., Галанин В.В. Моделирование системы пространственной мультипликативной обработки многочастотных сигналов. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*. 2010. Вип. 3. С.168-176. (Google Scholar, BASE, General Impact Factor)

29. Верлань А.Ф, Орлов В.В. Анализ требований к разрядности адаптивного решетчатого фильтра выделения сигналов в условиях помех. *Электронное моделирование*. 2011. № 4. С. 49-60. (Cambridge Scientific Abstracts, Index Copernicus, Inspec, Ulrich's Periodicals Directory)

30. Орлов В.В. Эффективность адаптивного обнаружения сигнала на основе теста Хотеллинга. *Збірник наукових праць інститута проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова*. Вип.57. Київ: 2010. С. 72-79.

31. Орлов В.В. Вероятностное моделирование безопасности судовой эргатической системы. *Судостроение: Сб. научных трудов*. Вып. 21. Одесса. 2012. С. 159-165.

32. Orlov V. Simulation of the sensor network configuration for the removal of ambiguousness in determination of coordinates in passive location. *International Journal of Frontiers in Sensors (FS)*. Science and Engineering Publishing Company. USA. v. 2, Iss. 4. December 2013. P.1-6. ISSN 2327-7297.

URL:https://www.academia.edu/27931516/Simulation_of_the_Sensor_Network_Configuration_for_the_Removal_of_Ambiguousness_in_Determination_of_Coordinates_in_Passive_Location. (Academia.edu, Crossref)

33. Гурман І. В. , Лисий М. І., Орлов В. В. Розробка методу зменшення неоднозначності визначення координат наземних об'єктів трипозиційною пасивною системою радіотехнічного контролю. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, радіоапаратостроєння*. Київ : НТУУ "КПІ". 2013. № 52. С. 74-83. (Web of Science, Index Copernicus, Google Scholar, BASE)

34. Orlov V.V., Lytvynenko O. A., Galanin V. V. Algorithms of multi frequency radiometry in the conditions of broadband interference. *Odessa Astronomical Publications*. Odessa. 2018. т. 31. С. 137-141. (Index Copernicus, BASE, WorldCat)

35. Orlov V.V., Lytvynenko O. A., Galanin V. V. Multi-frequency radio interferometry algorithm. *Odessa Astronomical Publications*. Odessa. 2019. v. 32. P. 100-102. (Index Copernicus, BASE, WorldCat)

36. Орлов В.В., Лисий М.І., Сівак В.А., Купрієнко Д.А., Кульчицький В. М., Добровольський А.Б. Дослідження можливостей звуколокації БПЛА у завданнях моніторингу терористичних загроз. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. Київ : НТУУ "КПІ", 2019. № 79. С. 24-32. (Web of Science, Index Copernicus) URL: <http://radar.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1571>.

37. Boltenkov V., Verpeta V., Maksymov M., Orlov V. The model of acoustic system for leak detection in pipelines. *Proceedings of TCSET'2000*. Lviv-Slavsko. 2000. P. 13-14.

38. Болтенков В.А., Верпета В.И., Королев А.В., Максимов М.В., Орлов В.В. Спектрально-корреляционные характеристики акустических сигналов в автоматизированных системах обнаружения течей на АЭС. *Автоматика-2000: Праці міжнар. конф. з управління*, м. Львів, 11-15 вересня 2000 р. Львів: Держ.НДІ інф. Структури, 2000. т.1. С. 45-51.

39. Орлов В.В. Анализ непрерывных акустических сигналов от течей трубопроводов высокого давления. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды*

VIII -ой межд. научн.-практ. конф., г. Одесса, 23–26 мая 2000 г. Одесса: ОНПУ, 2000. С. 31-32.

40. Орлов В.В., Миц С.В. Спектральные свойства квазинепрерывных акустических сигналов от потока газа в жидкости. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды межд. научн.-практ. конф., г. Одесса, 23-26 мая 2000г. Одесса: ОНПУ, 2000. С. 33-34.

41. Орлов В.В., Полищук Т.В. Помехозащита систем временной обработки акустических сигналов. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды II -й междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 28–31 мая 2001. Одесса: ОНПУ, 2001. С.103-104.

42. Орлов В.В. Обнаружение и распознавание импульсных акустических сигналов. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды III-ей междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 21–24 мая 2002 г. Одесса: ОНПУ, 2002. С.63.

43. Орлов В.В. Анализ потерь адаптивного компенсатора помех с ограниченной разрядностью выполнения операций. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды IV-ой междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 19–23 мая 2003. Одесса: ОНПУ, 2003. С. 42.

44. Орлов В.В., Дмитриева Н.О. Обнаружитель - распознаватель стационарных случайных процессов на решетчатой структуре. *Автоматика–2003* : Материалы 10–й междунар. конф. по автоматическому управлению. г. Севастополь, 15 – 19 сентября 2003. т.1. С. 128-129.

45. Орлов В.В., Положаенко С.А., Долобанько О.Л. Обнаружение сигнала в условиях неклассифицированной обучающей выборки. *Автоматика–2003* : Материалы 10 –й междунар. конф. по автоматическому управлению, г. Севастополь, 15 – 19 сентября 2003. Севастополь.: т.1. С. 157-159.

46. Орлов В.В. Анализ потерь решетчатых фильтров компенсации помех с ограниченной разрядностью весовых коэффициентов. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды V-ой междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 17–21 мая 2004. Одесса: ОНПУ, 2004. С. 57.

47. Орлов В.В. Адаптивное обнаружение и распознавание импульсных звуковых сигналов / В.В. Орлов, В.К. Савицкий. *Автоматика–2005* : Материалы 12–й междунар. конф. по автоматическому управлению. г. Харьков, 30 мая – 3 июня 2005. т.1. С. 130.

48. Орлов В.В. Адаптивное многоканальное обнаружение и распознавание классов акустических сигналов. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды VI-й междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 23–27 мая 2005. Одесса: ОНПУ, 2005. С. 52.

49. Орлов В.В., Еременко В.В. Вероятностные характеристики многоканальных систем обнаружения импульсных акустических сигналов. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды VI -й междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 23–27 мая 2005. Одесса: ОНПУ, 2005. С. 53.

50. Дрозд А.В., Орлов В.В. Методы вероятностной диагностики на основе адаптивной обработки сигналов в условиях помех. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды VII -й междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 22–26 мая 2006 г. Одесса: ОНПУ, 2006. С.43.

51. Орлов В.В., Еременко В.В. Многоканальные корреляционные алгоритмы обнаружения источников акустического излучения. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды VII-й междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 22–26 мая 2006. Одесса: ОНПУ, 2006. С. 55.

52. Орлов В.В., Гусев А.А. Экспертная система диагностики удаленных объектов акустического излучения. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: Труды VII -й междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 22–26 мая 2006 г. Одесса: ОНПУ, 2006. С.76.

53. Орлов В.В. Методы разработки автоматизированных систем технической диагностики на основе анализа акустических излучений от удаленных объектов АСУ. *Автоматика–2006* : Материалы 13-й междунар. конф. по автоматическому управлению. г. Винница, 25–28 сентября 2006. т.1. С. 68.

54. Орлов В.В. Иерархическая структура корреляционной обработки сигналов для локализации объекта акустического излучения. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды VIII -ой межд. научн.-практ. конф., г. Одесса, 21–25 мая 2007 г. Одесса: ОНПУ, 2007. С. 144.

55. Орлов В.В., Еременко В.В. Автоматизированная система диагностики звукопеленгаторов дальнего действия. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды VIII-ой междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 21–25 мая 2007. Одесса: ОНПУ, 2007. С. 181.

56. Орлов В. В. Орлов В. В., Чудак М.В. Интерактивные видеоимитаторы на WEB платформе с применением 3D и Flash технологий. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды IX-ой междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 19–23 мая 2008. Одесса: ОНПУ, 2008. С. 58.

57. Орлов В.В. Моделирование систем цифровой обработки сигналов на WEB платформе. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды IX-ой междунар. научн.-практ. конф., г. Одесса, 19–23 мая 2008. Одесса: ОНПУ, 2008. С. 132.

58. Орлов В.В., Мурсалимова А.В. Математическое моделирование адаптивной акустической системы пеленгации снайперов. *Автоматика–2008* : Материалы XV-й междунар. конф. по автоматическому управлению. г. Одесса, 23–26 сентября 2008. т.1. С. 403-404.

59 Орлов В. В. Чудак М.В. Адаптивное управление процессом передачи 3D сцен в сети Internet. *Автоматика–2008* : Материалы 15-й межд. конф. по автоматическому управлению. г. Одесса, 23–26 сентября 2008. т.1. С. 405-407.

60. Орлов В. В., Чудак М.В. Оптимизация модели системы обнаружения и распознавания объектов акустического излучения. *Контроль и управление в сложных системах КУСС-2008* : Тезисы докладов IX-й междунар. конф. г. Винница, 21-24 октября 2008. Секция обработка сигналов, изображений. С.36.

61. Орлов В.В., Шейко Д.Ю. Адаптивная микрофонная решетка для дистанционного прослушивания источников речевой информации на фоне помех. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды X-ой межд. научн.-практ. конф., г. Одесса, 18–22 мая 2009 г. Одесса: ОНПУ, 2009. С. 199.

62. Орлов В.В., Коваленко А. Ю. Разработка компьютеризированных систем контроля удаленных объектов акустического излучения. *Контроль и управление в сложных системах КУСС-2010* : Тезисы докладов X-й междунар. конф. г. Винница, 19-21 октября 2010. С.99.

63. Орлов В. В., Шалаев А.В. Оптимизация многопрограммной интерактивной трансляции видеоконтента в сети IP. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды XI –ой междунар. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 24–28 мая 2010. Одесса: ОНПУ, 2010. С. 142.

64. Орлов В.В., Коваленко А.Ю. Компьютеризированные системы адаптивного обнаружения и распознавания акустических сигналов в условиях кратковременных помех. *Соврем. информац. и электрон. технологии: Труды XI -й междунар. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 24–28 мая 2010. Одесса: ОНПУ, 2010. С. 163.

65. Орлов В. В., Коваленко А.Ю. Эффективность распознавания сигналов с учетом идентификации эталонов в условиях параметрической неопределенности. *Автоматика–2010* : Материалы 17-й междунар. конф. по автоматическому управлению. г. Харьков, 27–29 сентября 2010. т.1. С. 144-146.

66. Орлов В. В., Коваленко А.Ю. Обеспечение идентичности каналов микрофонной решетки. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды XII-ой между. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 4–8 июня 2011 г. Одесса: ОНПУ, 2011. С. 123.

67. Орлов В.В., Ганчев Г.Д. Алгоритмы и программно-аппаратные средства виброакустической диагностики судовых энергетических установок. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды XIII -ой между. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 4–8 июня 2012 г. Одесса: ОНПУ, 2012. С. 65.

68. Орлов В.В. Оптимизация пространственной мультипликативной обработки многочастотных сигналов морского радара. *Автоматика 2012: Материалы XIX-й междунар. конф. по автоматическому управлению*. К: НУХТ, 2012. С. 330-331.

69. Гурман І. В., Лисий М. І., Орлов В. В. Розробка методу зменшення неоднозначності визначення координат наземних об'єктів трипозиційною пасивною системою радіотехнічного контролю. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи: Міжнар. науково-технічна конф.*, м. Київ, 11–15 березня 2013р. Київ : НТУУ "КПІ", 2013. С. 138-139.

70. Орлов В.В., Лысенко В.Е. Проектирование морских локационных систем по вероятностным критериям качества. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды XIV-ой междунар. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 27–31 мая 2013. Одесса: ОНПУ, 2013. С. 273-275.

71. Орлов В.В., Бережной К.Ю. Исследование возможностей звукоприемной системы внешних сигналов водного транспорта. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды XIV-ой междунар. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 27–31 мая 2013. Одесса: ОНПУ, 2013. С. 270-272.

72. Орлов В.В. Войтецкий И. Е., Лысенко В. Е. Акустическая система мониторинга угроз терактов на водном транспорте. *Соврем. информац. и электрон. технологии: труды XVI-ой между. научн.-практ. конф.*, г. Одесса, 27–31 мая 2015. Одесса: ОНПУ, 2015. С. 105-106.

73. . Орлов В.В., Великодний С. С., Бережной К. Ю. Информационная технология совершенствования судовых систем приема внешних звуковых сигналов. *Соврем. информац. и электрон. технологии*: труды XVI-ой межд. научн.-практ. конф., г. Одесса, 27–31 мая 2015. Одесса: ОНПУ, 2015. С. 107-108.

74. Орлов В.В., Лысенко В.В. Коррекция частотных искажений широкополосных сигналов в адаптивной микрофонной решетке. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи*: Міжнар. науково-технічна конф., м. Київ, 14–20 березня 2016. Київ : НТУУ "КПІ", 2016. С. 35-37.

75. Орлов В.В., Бережной К.Ю. Адаптивная акустическая система пеленгации террористических угроз. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи*: Міжнар. науково-технічна конф., м. Київ, 14–20 березня 2016р. Київ : НТУУ "КПІ", 2016. С. 37-39.

76. Орлов В.В. Аналіз ефективності пасивних систем локації рухомого транспорту в задачах моніторингу терористичних погроз. *Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи*: Міжнар. науково-технічна конф., м. Одеса, 12-13 вересня 2019р. Одеса: Військова академія(м. Одеса). 2019. С. 95-96.

77. Орлов В.В. Звуколокація безпілотних літальних апаратів в задачах попередження терористичних погроз. *Кібербезпека в Україні: правові та організаційні питання*: Міжнар. науково-практ. конф., м. Одеса, 22 листопада 2019 р. Одеса: ОДУВС, 2019. С.90.

78. Орлов В.В., Симоненков В.М. Розвиток пасивних систем звукової локації безпілотних літальних апаратів в умовах терористичних загроз. Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил : XII науково-практ. конф., м. Київ, 14 – 15 листопада 2019 р. Київ : Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, 2019. С. 175.

АНОТАЦІЯ

Орлов В. В. Розвиток теорії та техніки дистанційного виявлення і розпізнавання об'єктів адаптивними системами в умовах короткочасних завад. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук з спеціальності 05.12.17 – “Радіотехнічні та телевізійні системи” – Військова академія (м. Одеса).– Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2020.

В роботі вирішена важлива науково-практична проблема розвитку теорії і техніки створення адаптивних систем спостереження за фізичними процесами для підвищення якісних характеристик локаційних систем виявлення і розпізнавання сигналів в умовах короткочасних завад різного походження при обмежених обчислювальних ресурсах. Розвинені методи аналізу, синтезу та оптимізації адаптивних систем виявлення і розпізнавання, спрямовані на встановлення вимог до параметрів таких систем (розрядності, обчислювальних витрат і обсягу навчальної

вибірки), а також на визначення вірогідності рішень, прийнятих в умовах короткочасних завад. Розвинено метод побудови адаптивних систем на основі решітчастої структури, що дозволило виключити операції оцінювання та звернення коваріаційних матриць, істотно зменшити обчислювальну складність. Розвинено метод аналізу помилок квантування вхідних вибірок для прямих методів адаптації, що спрощує проектування цифрових адаптивних систем. Запропоновані рішення дозволяють створювати системи з контрольованими помилками рішень, що володіють в адаптивному режимі ефективністю, близькою до потенційно досяжної.

Ключові слова: адаптація, навчальна вибірка, розрядність, виявлення, розпізнавання, сигнал, завада, Вірогідність, ймовірність помилки.

ABSTRACT

Orlov V. V. Development of the theory and technology of remote detection and recognition of objects by adaptive systems in the conditions of short-term interference. – Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

The dissertation seeking the scientific degree of the Doctor of Engineering science on a specialty 05.22.13 – Radio and television systems. – Military Academy (Odessa).– O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

An important scientific and practical problem of the development of the theory and technology of creating adaptive systems for observing physical processes to improve the quality characteristics of adaptive systems for detecting and recognizing signals in conditions of short-term interference of various origins with limited computing resources is solved in the work. Methods for analysis, synthesis and optimization of adaptive detection and recognition systems have been developed, aimed at establishing requirements for the parameters of such systems (bit depth and computational costs and the volume of the training sample), as well as at determining the reliability of decisions made in conditions of short-term interference. A method for constructing adaptive systems based on a lattice structure was developed, which made it possible to exclude the operations of estimating and inverting covariance matrices, and to significantly reduce computational complexity. A method for analyzing digital systems of interference protection is developed taking into account the quantification errors of input samples. For direct adaptation methods, analytical dependences are obtained for calculating the losses from bit width, which greatly simplifies the design of digital adaptive systems. The proposed solutions make it possible to create systems with controlled probabilities of decision-making errors, with an efficiency close to potentially achievable in an adaptive mode.

Key words: adaptation, teaching sample, bit, detection, recognition, signal, interference, reliability, probability of error.

АННОТАЦИЯ

Орлов В. В. Развитие теории и техники дистанционного обнаружения и распознавания объектов адаптивными системами в условиях кратковременных помех. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.17 – "Радиотехнические и телевизионные системы". – Военная академия (г. Одесса). – Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, Одесса, 2020.

В работе решена важная научно-практическая проблема развития теории и техники создания адаптивных систем наблюдения за физическими процессами для повышения качественных характеристик локационных адаптивных систем обнаружения и распознавания сигналов в условиях кратковременных помех различного происхождения при ограниченных вычислительных ресурсах. Развита методика синтеза, анализа и оптимизации адаптивных систем обнаружения и распознавания, направленные на установление требований к параметрам (разрядности и вычислительным затратам и объему обучающей выборки), а также на определение достоверности решений, принимаемых в условиях кратковременных помех.

Разработан научно-методологический подход и критерии для синтеза, оптимизации и анализа цифровых адаптивных систем обнаружения и распознавания. Критерий основан на декомпозиции среднего риска и вероятности ошибок принятых решений с учетом вероятностей ошибок, обусловленных конечным размером системы, объемом обучающей выборки и разрядностью вычислений. Такой подход позволяет последовательно решать задачи синтеза, оптимизации и анализа, определить объем обучающей выборки, разрядность и объем вычислительных затрат при гарантированном уровне потерь.

Разработанные методы позволяют создавать системы обнаружения и распознавания классов сигналов, исследовать влияние существенных параметров систем на длительность адаптации по вероятностным критериям качества. Для различных моделей сигналов синтезированы решающие статистики, инвариантные к изменениям кратковременных помех. Это достигнуто решением задач оптимизации для стабилизации выходной мощности помех и обеспечения высокой скорости адаптации на основе оценок максимального правдоподобия параметров стационарных помех (дождя, облаков, тумана, снега, града) и кратковременных помех (пассивных помех, «ангел-эхо», морских волн, точечных малоподвижных объектов).

Определены аналитические зависимости вероятностей ошибок принятия решений от оценок параметров входного процесса, что позволяет проводить контроль достоверности решений в реальном времени. Разработаны методики синтеза и анализа адаптивных систем совместного обнаружения и распознавания на основе минимизации среднего риска при фиксированной вероятности ошибки первого рода. Полученное правило сводится к сравнению максимального с функционалов отношения правдоподобия с пороговым уровнем с учетом ограничений, налагаемых на платы за ошибки. Методика анализа систем

совместного обнаружения-распознавания основана на обобщении понятия ошибок первого и второго рода при многоальтернативной проверке гипотез.

Развит метод построения адаптивных систем на основе решетчатой структуры, что позволяет исключить операции оценивания и обращения ковариационных матриц, существенно уменьшить вычислительная сложность. Развит метод анализа потерь, обусловленных конечной разрядностью аналогово-цифрового преобразования входных выборок. Для прямых методов адаптации получены аналитические зависимости потерь от разрядности, что значительно упрощает проектирование цифровых адаптивных систем. Предложенные решения позволяют создавать системы с контролируемыми вероятностями ошибок принятия решений, обладающих в адаптивном режиме эффективностью, близкой к потенциально достижимой.

Разработаны программно-аппаратные комплексы для проведения имитационного и натурного моделирования систем: радиолокации, звуколокации объектов акустического излучения, сейсмолокации и гидролокации. Создана информационная технология автоматизации процессов обработки экспериментальных данных для оптимизации параметров эталонных сигналов и адаптивных систем. На этапах лабораторных, стендовых испытаний экспериментально исследованы характеристики адаптивных систем обнаружения и распознавания дальнего и ближнего действия.

Ключевые слова: адаптация, обучающая выборка, разрядность, обнаружение, распознавание, сигнал, помеха, достоверность, вероятность ошибки.