

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Супрун Олександр Олександрович

УДК. 621.396.965

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ, РОЗДІЛЕННЯ ТА ОЦІНКИ
ЧИСЛА ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ СТОХАСТИЧНИХ СИГНАЛІВ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Карташов Володимир Михайлович,
Харківський національний
університет радіоелектроніки
МОНмолодьспорту України,
завідувач кафедри радіоелектронних
систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Піза Дмитро Макарович,
Запорізький національний технічний
університет МОНмолодьспорту України,
директор Інституту інформатики та
радіоелектроніки, завідувач кафедри
радіотехніки та телекомунікацій;

доктор технічних наук, професор
Печенін Валерій Васильович,
Національний аерокосмічний університет ім.
М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний
інститут» МОНмолодьспорту України,
професор кафедри проектування радіоелек-
тронних систем літальних апаратів.

Захист відбудеться "_____" _____ 2013 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий "_____" _____ 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна тенденція розвитку радіотехнічних систем пасивного спостереження характеризується неухильним зростанням якісних показників радіоелектронних систем отримання інформації про досліджувані об'єкти та удосконаленням алгоритмів їх функціонування. Ця інформація використовується в алгоритмах пеленгаційних систем для виявлення, ідентифікації та вимірювання характеристик об'єктів при наявності флуктуаційних завад і завад, що маскують корисний сигнал, а також застосовується для керування фазованими антенними решітками (ФАР) в сучасних системах радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії, дистанційного зондування середовищ тощо. Очевидно, що якість інформації, яка використовується для ідентифікації об'єктів тим вища, чим краще роздільна здатність системи спостереження, яка визначається як здатність системи розрізняти близько розташовані у просторі точкові джерела випромінювання. Флуктуаційні завади та завади, що маскують зменшують ефективність роботи систем спостереження, а в ряді випадків при низьких співвідношеннях сигнал / шум адаптивні системи працюють гірше, ніж традиційні апертурні антени.

Значний внесок в розробку теорії і техніки стійких адаптивних систем оцінювання просторових спектрів внесли такі вчені як М.О. Арманд, S.P. Applebaum, В.Ф. Писаренко, L.E. Brennan, Я.Д. Ширман, W.F. Gabriel, B. Widrow, J. Capon, J.P. Burg, Я.С. Шифрин, L.J. Griffiths, та ін.

Розробка теорії і методів просторово-часової обробки сигналів мультисенсорних радіоелектронних систем збору інформації актуальна для багатьох областей науки і техніки. В акустичних системах дистанційного зондування атмосфери з адаптивними антенними решітками попереднє визначення напрямків на джерела шумового випромінювання дозволяє, використовуючи отриману інформацію, адаптивно вибирати напрямки зондування та напрямки випромінювання корисного сигналу і у такий спосіб істотно підвищувати відношення сигнал / завада на виході системи. Наприклад, при лікуванні онкозахворювань методом гіпертермії виникає необхідність контролю кількості тепла, переданого хворим і здоровим тканинам в процесі лікування. При цьому дослідник має у своєму арсеналі ряд датчиків, наприклад ультразвукових приймачів, певним чином розташованих на досліджуваному об'єкті, сигнали яких опосередковано характеризують процеси, що відбуваються в живій тканині. Втручання ж контактних вимірників в цей процес призведе до порушення і часто просто до загибелі клітин, що, природно, неприпустимо. У цьому прикладі проблему отримання просторових спектральних оцінок з високою роздільною здатністю мабуть видно більш наочно, ніж у традиційних радіолокаційних додатках.

Таким чином, в даний час досить актуальною є тема дисертаційних досліджень, направлених на розробку стохастичних методів стійкої просторово-часової обробки сигналів при довільних співвідношеннях сигнал / шум, при наявності нестационарних завад та апіорній невизначеності щодо розподілів щільності ймовірності, а також розвитку та математичній формалізації концепції «надрозділення» в радіотехніці. Актуальність цієї задачі обумовлена основними тенденціями розвитку сучасної науки і техніки систем радіолокації, гідролокації,

радіоастрономії, дистанційного зондування середовищ, медичного приладобудування та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота зв'язана з виконанням планової держбюджетної НДР «Розробка принципів побудови вітчизняного комплексу інформаційно – вимірювальних систем для прогнозування й аналізу наслідків надзвичайних ситуацій» № ДР 0109U0016351200 у Харківському національному університеті радіоелектроніки на кафедрі Радіоелектронних систем, в частині підрозділу «Розробка принципів побудови комплексованих радіолокаційно - радіоакустичних систем для метеорологічного моніторингу атмосфери в умовах надзвичайних ситуацій». У якій здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є розвиток адаптивних стохастичних методів отримання інформації про просторовий розподіл джерел флуктуаційних сигналів за наявності завад і розробка теоретичних основ синтезу оптимальних алгоритмів інваріантних щодо статистичних властивостей завади адаптивної просторово-часової обробки сигналів.

Основними завданнями дослідження є:

- вивчення стохастичних методів збору інформації про просторові розподіли джерел флуктуаційних сигналів з метою визначення можливості виділення інваріантних щодо властивостей завад інформаційних параметрів сигналів;
- розробка теоретичних основ інваріантної до властивостей завад просторово-часової обробки сигналів за даними пеленгаційної систем спостереження та синтез алгоритмів адаптації антенних решіток, що використовують сукупність статистичних ознак сигналів випромінених об'єктами;
- аналіз критеріїв просторово-часового розділення сигналів з метою формування вирішальних правил, які б найбільш повно враховували апіорну інформацію про об'єкти, сигнали та їхній розподіл;
- розробка математичної моделі і методик імітаційного моделювання роботи адаптивних систем просторово-часової обробки, які стійко працюють при низьких співвідношеннях сигнал / завада;
- синтез квазіоптимальних алгоритмів оцінювання координат центроїда групи просторово нерозрізнених джерел сигналів з використанням інваріантних моделей;
- розробка рекомендацій щодо стратегії використання сукупності статистичних вирішальних правил при обробці сигналів в адаптивних антенних решітках, що працюють в завадовій обстановці, яка змінюється з пливом часу.

Об'єкт дослідження - процеси взаємодії сигналів з завадами і перетворення стохастичних інформаційних сигналів в адаптивних системах просторово-часової обробки сигналів.

Предмет дослідження - характеристики та властивості адаптивних алгоритмів просторово-часової обробки стохастичних сигналів, які працюють в умовах нестационарних завад.

Методи досліджень - У роботі застосовуються теоретичні та експериментальні методи. Теоретичні методи аналізу систем застосовані для подання узагальнених моделей систем просторово-часової обробки сигналів. Теоретичні ме-

тоди статистичної радіотехніки використані для синтезу оптимальних і квазіоптимальних стійких алгоритмів оцінювання просторових спектрів, а також при аналізі процесів і синтезі вирішальних правил для алгоритмів і пристроїв адаптивного виявлення джерел сигналів, як стаціонарних, так і динамічних. Експериментальні методи чисельного моделювання використані для верифікації алгоритмів, оцінки меж застосовності методів та дослідження особливостей роботи алгоритмів в умовах наближених до реальних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в теоретичному обґрунтуванні та розв'язанні задачі синтезу оптимальної комплексної обробки стохастичною інформації мультисенсорних радіотехнічних систем спостереження за просторово розподіленими джерелами сигналів з метою підвищення надійності їхньої роботи у разі нестаціонарних завад. У рамках цього завдання:

- вперше запропоновано стохастичний критерій просторового розділення джерел сигналів на основі їхніх імовірнісних моделей, в якому на відміну від відомих не накладаються обмеження на структуру алгоритму обробки сигналів і властивості завад;
- вперше запропоновано метод оцінки просторових координат центроїда групи просторово нерозділених об'єктів, що відрізняється від відомих тим, що дозволяє адаптивно змінювати інтервали накопичення сигналу при змінах стохастичних властивостей завад, чим забезпечує високу стійкість роботи синтезованих на його основі алгоритмів;
- вперше для отримання оптимальних оцінок просторово-часових спектрів в умовах дії нестаціонарних завад запропоновано використовувати комбінацію лінійних і нелінійних робастних алгоритмів, що дозволило створювати алгоритми, які не втрачають працездатності при низьких співвідношеннях сигнал / шум;
- отримала подальший розвиток методика синтезу квазіоптимальних вирішальних правил на основі рекурентних процедур обчислення оцінок просторово-спектральної матриці спостережуваних процесів і встановлено межі, при яких можлива заміна її моделі на вибірккову матрицю, що дозволило створити клас алгоритмів просторово-часової обробки з гранично можливим розділенням за умов їхньої інваріантності щодо завад;
- вперше показано, що при обмежених по простору вибірках спостережуваних сигналів використання довільного набору базисних функцій при синтезі вирішальних правил призводить до деградації роздільної здатності відомих алгоритмів. Для удосконалення методів просторово – часової обробки сигналів запропоновано використовувати систему базисних функцій моделі, які точно описують поле в точках простору, де здійснюється вибірка;
- отримала подальший розвиток реалізація обчислювальних процедур в алгоритмах оптимальної обробки сигналів при вирішенні прикладних задач просторово-часової обробки сигналів в адаптивних антенних решітках. На відміну від відомих, запропонована математично обґрунтована процедура оцінювання помилок у структурі стохастичних сигналів, що обумовлюються впливом неврахованих похибок в апаратурі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці ряду нових технічних рішень, алгоритмів і рекомендацій:

розроблено алгоритм для визначення довжини – навчальної вибірки при проведенні спостережень за групою просторово нерозділених джерел сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо їх просторового розподілу і імовірнісних характеристик завад, що дозволило отримувати достовірні оцінки координат центроїда групи;

розроблено метод оцінки просторово - часових спектрів і робастний алгоритм формування вагових коефіцієнтів адаптивної системи пеленгації на його основі, який не дає помилкових оцінок при зниженні співвідношень сигнал / шум нижче критичних значень, як це має місце у відомих адаптивних системах;

на основі квазіоптимального вирішального правила синтезована структура пристрою просторово-часової обробки сигналів, що забезпечує згоду теоретичних і експериментальних результатів вже при обсягах вибірок близько 25 відліків;

розроблена математична модель системи просторово – часової обробки сигналів, яка дозволяє оперативно для заданих сигналів і завад розрахувати необхідний час спостереження з метою забезпечення необхідної якості виявлення;

дані рекомендації щодо структури спеціалізованого обчислювального пристрою для виявлення джерел випромінювання.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці програмно-апаратних засобів і алгоритмів просторово-часового оброблення сигналів систем спостереження у держбюджетній НДР: «Розробка принципів побудови вітчизняного комплексу інформаційно - вимірювальних систем для прогнозування й аналізу наслідків надзвичайних ситуацій» № ДР 0109U0016351200, в частині підрозділу «Розробка принципів побудови комплексованих радіолокаційно - радіоакустичних систем для метеорологічного моніторингу атмосфери за умов надзвичайних ситуацій», виконаної в Харківському національному університеті в період з 2008 по 2010 роки. Отримані в дисертаційній роботі теоретичні результати та рекомендації були використані в навчальному процесі кафедри Радіоелектронних систем ХНУРЕ.

Особистий внесок здобувача. У роботах, які написані у співавторстві, автор виконував постановку завдань, розробляв методи їх вирішення, брав участь у постановці експериментів та розробці програмного забезпечення для аналізу результатів. Розроблено методику оцінки просторових координат центроїда групи просторово нерозділених об'єктів. Запропоновано стохастичний критерій просторового розділення джерел сигналів на основі їх імовірнісних моделей. Розроблено квазіоптимальні вирішальні правила на основі рекурентних процедур обчислення оцінок просторово-спектральної матриці. Розроблено алгоритм оптимального оцінювання просторово-часових спектрів в умовах дії нестационарних завад, а також запропоновано використовувати комбінацію лінійних і нелінійних робастних алгоритмів для підвищення достовірності роботи систем спостереження.

Зокрема, в [1, 7] запропоновано алгоритм оцінки координат центроїда групи джерел, розроблено програмне забезпечення для моделювання, в [2] досліджена стійкість методу до впливу завад, запропонована адаптивна процедура, яка прискорює збіжність алгоритму, в [3] отримано аналітичний вираз для помилок

оцінювання, розраховані спотворення сигналів та проведено машинне моделювання, в [4, 8] - розроблені теоретичні основи методів адаптації системи спостереження з використанням інваріантних моделей. У роботах [5, 7] отримано аналітичні вирази і розраховані чисельні оцінки розподілів сигналів, у [6] розроблено алгоритм обробки радіолокаційних сигналів, а в роботі [9,12] запропонована методика розрахунку коефіцієнтів адаптивного фільтру в контурі управління антенної решітки, що сканує, в [10, 11] запропоновано і змодельовано на ЕОМ алгоритм фокусування адаптивної антенної решітки.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на 7 міжнародних і республіканських наукових симпозиумах, конференціях. У тому числі на Міжнародній конференції “CriMiCo’2010” (м. Севастополь, 2010), Міжнародній конференції “IEEE 11-th International Conference “The Experience of designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”. (CADSM’ 2011)” (м. Львів, 2011), на 7-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011» (м. Севастополь, 2011), на Міжнародній науково-практичній конференції «Обработка сигналов и негауссовских процессов» (м. Черкаси, 2011), на четвертому міжнародному форумі «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ–2011 (м. Харків, 2011).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 12 наукових працях: з них 5 статей та 7 доповідей на конференціях і форумах.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, переліку умовних позначень, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Її повний обсяг складає 121 сторінку, з них 112 сторінок основного тексту. Дисертація містить 18 рисунків. Список використаних джерел на 9 сторінках нараховує 90 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, викладено зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Сформульовані тема і задачі досліджень, вказані об'єкт, предмет і методи досліджень. Показана наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок автора в роботах, виконаних в співавторстві, апробація і відомості про публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** дисертації проведено аналіз робіт, присвячених дослідженню критеріїв просторової роздільної здатності радіотехнічних систем, та методів виявлення та селекції джерел випромінювання. Проаналізовано переваги та недоліки алгоритмів «надрозділення», що використовуються у сучасних адаптивних антенних решітках для зменшення впливу різних класів завад. Показано, що з позицій повноти використання статистичної інформації щодо характеристик сигналів і завад ці алгоритми є локально оптимальними. Задачу розділення сигналів на тлі випадкових завад сформульовано як задачу визначення числа сигналів і одночасно оцінки їхніх параметрів. Показано, що для синтезу оптимальних алгоритмів просторово-часової обробки сигналів в умовах апіорної невизначеності необхідно задатися як мінімум двома критеріями: зокрема, критерієм прос-

торового розділення і критерієм ефективності роботи алгоритму або системи спостереження та побудувати узагальнену цільову функцію аргумент екстремуму якої має задовольнити обом критеріям.

Другий розділ присвячено синтезу алгоритмів спільного виявлення, розділення та оцінки кутових координат точкових джерел сигналів. Розглянуто вузько смуговий та широко смуговий варіанти алгоритмів. Функціонал відносини правдоподібності, який використано для побудови вирішального правила, має вигляд:

$$l(\vec{X}_0^{k+1}(t)) = \prod_{i=0}^{k-1} l(x_i(t)) = \exp \left\{ \frac{2}{N_0 T} \sum_{i=0}^{k-1} [c_i^2 + s_i^2] \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{T}{2N_0} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \left[\frac{2c_i}{T} - \sum_{m=1}^M A_m \cos \left(2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot (i-1) \cdot \sin(\theta_m) + \varphi_m \right) \right]^2 \right\} \times \quad (1) \\ \times \exp \left\{ -\frac{T}{2N_0} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \left[\frac{2s_i}{T} - \sum_{m=1}^M A_m \sin \left(2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot (i-1) \cdot \sin(\theta_m) + \varphi_m \right) \right]^2 \right\},$$

де $c_i = \int_{t_0}^{t_0+T} x_i(t) \cos(\omega_0 t) dt$; $s_i = \int_{t_0}^{t_0+T} x_i(t) \sin(\omega_0 t) dt$; $i = 0, \dots, k-1$, k — число

приймальних елементів системи спостереження; d — відстань між приймальними елементами; A_m — амплітуда локального джерела випромінювання; λ — довжина хвилі; θ_m — кут падіння фронту хвилі локального джерела; φ_m — випадкова фаза сигналу; T — інтервал спостереження; N_0 — спектральна щільність білого шуму.

Відношення правдоподібності (1) відносно кількості джерел для вибірки $\vec{Z}_1^{2k}$ має вигляд:

$$l(\vec{Z}_1^{2k} / M) = (2\pi)^{-k} \sigma_z^{-2k} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_z^2} \sum_{j=1}^{2k} [\vec{Z}_j - E\{\vec{Z}_j / M\}]^2 \right\}, \quad (2)$$

де σ_z^2 — дисперсія z_j , $j = 1, 2, \dots, 2k$.

Якщо позначити $\alpha_m = A_m \cdot \cos(\varphi_m)$; $\beta_m = A_m \cdot \sin(\varphi_m)$; $\varepsilon_m = \sin(\theta_m)$, то вектор оцінок можна сформулювати як $\vec{P}_\varepsilon = [\alpha_1, \beta_1 \quad \alpha_2, \beta_2 \quad \dots \quad \alpha_M, \beta_M]$. Тоді систему рівнянь максимальної правдоподібності відносно векторного параметра $\vec{P}_\varepsilon$ можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{\partial \ln l(\vec{Z}_1^{2k})}{\partial \vec{P}_\varepsilon} \bigg|_{\vec{P}_\varepsilon = \hat{\vec{P}}_\varepsilon} = \frac{1}{2\sigma_z^2} (\vec{Z}_1^{2k} - \vec{X}_\varepsilon \cdot \vec{P}_\varepsilon)^T \cdot \vec{X}_\varepsilon = 0. \quad (3)$$

Розв'язком цієї системи є вектор

$$\hat{\vec{P}}_\varepsilon = [\vec{X}_\varepsilon^T \cdot \vec{X}_\varepsilon]^{-1} \cdot \vec{X}_\varepsilon^T \cdot \vec{Z}_1^{2k} = \vec{W}_\varepsilon \cdot \vec{Z}_1^{2k}, \quad (4)$$

де $\vec{X}_\varepsilon$ матриця розміром $2k \times 2M$ елементів.

Вирішальне правило побудовано наступним чином. Обчислюються оцінки величин $\hat{\alpha}_1, \hat{\beta}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\alpha}_M, \hat{\beta}_M$. Потім шляхом зворотного переходу за цими оцін-

ками обчислюються оцінки амплітуд: $\hat{A}_1 = \sqrt{\hat{\alpha}_1^2 + \beta_1^2}$, ..., $\hat{A}_M = \sqrt{\hat{\alpha}_M^2 + \beta_M^2}$. Ці величини підставляються у функцію правдоподібності (1) і шукається її максимум з найважливішого параметру θ_m і відповідні цьому максимуму попередні оцінки $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_M$. Наявність цих оцінок дозволяє перейти до наступного етапу перевірки конкуруючих статистичних гіпотез. Значення оцінок амплітуд сигналів $\hat{A}_m$ порівнюються з порогом h . При перевищенні амплітудою $\hat{A}_m$ порога h приймається рішення про наявність m -го джерела. Якщо величина порога перевищується амплітудами декількох джерел, то відповідні їм оцінки перевіряються на мінімальну відстань $\Delta\theta$, відповідне заданому розділенню за кутовою координатою. При виконанні умови $|\hat{\theta}_j - \hat{\theta}_i| \leq \Delta\theta$, приймається рішення про наявність одного джерела з кутовою координатою $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_j + \hat{\theta}_i)/2$. Такі перевірки здійснюються попарно для всіх виявлених джерел. Величина порога h вибирається за заданою величиною ймовірності хибної тривоги α_0 із співвідношення

$$P\left\{\left(\hat{A}_1 \geq h\right) \cup \left(\hat{A}_2 \geq h\right) / H_0\right\} = \alpha_0. \quad (5)$$

У разі ширококутових сигналів, математичне формулювання задачі полягає в записі цільової функції

$$\left| \begin{array}{l} \hat{\vec{\rho}}(1) \\ \hat{\vec{\rho}}(2) \\ \hat{\vec{\varepsilon}} \end{array} \right| = \begin{array}{l} \arg \min \\ \frac{\theta_A}{2} \leq \varepsilon_m \leq \frac{\theta_A}{2} \\ m=1,2 \end{array} \left\{ \min \sum_{l=1}^L \left[\vec{Z}_0^{2k}(l) - \vec{X}_\varepsilon(l) \vec{\rho}(l) \right]^T \cdot \vec{N}_0^{-1} \cdot \left[\vec{Z}_0^{2k}(l) - \vec{X}_\varepsilon(l) \vec{\rho}(l) \right] \right\}, \quad (6)$$

де вектори оцінюваних параметрів $\vec{\rho}(l) = [\alpha_{1l}, \beta_{1l}, \alpha_{2l}, \beta_{2l}, \dots, \alpha_{Ml}, \beta_{Ml}]$; $\alpha_{ml} = A_{ml} \cos(\varphi_{ml})$; $\beta_{ml} = A_{ml} \sin(\varphi_{ml})$; $l=1,2$; $\varepsilon_m = \sin(\theta_m)$; $\vec{N}_0^{-1}$ — зворотна коваріаційна матриця шумів на виходах приймальних елементів.

Для оцінювання параметрів центроїда групи джерел сигнали сумарного і різницевого каналів в комплексному вигляді позначимо відповідно

$$\dot{x}_i^s = \dot{s}_i^s + \dot{n}_i^s, \quad (7)$$

$$\dot{x}_i^d = \dot{s}_i^d + \dot{n}_i^d, \quad (8)$$

де $\dot{s}_i^s = sr_i^s + jsi_i^s$; $\dot{s}_i^d = sr_i^d + jsi_i^d$ верхні індекси s і d означають належність відліку сумарному і різницевому каналам; i — номер відліку у вибірці; sr і si — реальна і уявна компоненти; $\text{Re}\{\dot{n}_i\} = N(0, \sigma^2)$ — гаусівський шум каналів прийому.

З сигналів (7) і (8) сформуємо матрицю

$$\vec{A} = \begin{vmatrix} \dot{x}_i^s \\ \dot{x}_i^d \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{x}_i^s & \dot{x}_i^d \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{x}_i^{s*} \cdot \dot{x}_i^s & \dot{x}_i^{s*} \cdot \dot{x}_i^d \\ \dot{x}_i^{d*} \cdot \dot{x}_i^s & \dot{x}_i^{d*} \cdot \dot{x}_i^d \end{vmatrix}, \quad (9)$$

де символ $*$ означає комплексне сполучення.

Представимо матрицю (9) у вигляді двох співмножників

$$\vec{A}' = \vec{L} \cdot \vec{L}^T, \quad (10)$$

де $\vec{L} = \begin{bmatrix} i_{11} & 0 \\ i_{21} & i_{22} \end{bmatrix}$; верхнім символом T — позначена операція транспонування матриці.

За оцінками коефіцієнтів $\hat{l}_{22}^2$ та $\hat{l}_{21}^2$ можна обчислити ймовірність хибної тривоги P_F та ймовірність правильного виявлення P_D

$$P_F = 1 - P_D = 1 - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\Gamma(N + i - 1/2)}{\Gamma(N - 1/2) \cdot i!} \cdot \frac{[\hat{l}_{22}^2 / C^2]^i}{[1 + \hat{l}_{22}^2 / C^2]^{N+1-1/2}}, \quad (11)$$

де $\Gamma(\bullet)$ — гама-функція.

На рис. 1 і 2 показані робочі характеристики алгоритму у випадку, коли спостерігаються дві цілі, симетрично рознесені на кут $\Delta\theta$ щодо нормалі до азимутальної площини антеної системи при $N=1$ та $\hat{l}_{21}^2=0$ при $\alpha=0,5$ (крива 1), $\alpha=1,0$ (крива 2), $\alpha=2,0$ (крива 3), $\alpha=4,0$ (крива 4) і $\alpha=10,0$ (крива 5).

Порівнюючи криві на рис.1 з аналогічними даними для класичного способу амплітудного виявлення одиночних цілей, видно, що при низьких співвідношеннях сигнал / шум робочі характеристики практично ідентичні.

Порівнюючи криві на рис.1 і рис.2 видно, що робота системи обробки з ростом числа накопичуваних імпульсів значно поліпшується, так при ймовірності помилкової тривоги 0,05 вірогідність правильного виявлення не перевищує 0,7 навіть для $\alpha=10,0$, в той час як при збільшенні числа накопичуваних імпульсів до десяти знижуються вимоги до співвідношення сигнал / шум до $\alpha=2,0$, що істотно перевищує аналогічний показник класичного вимірювача.

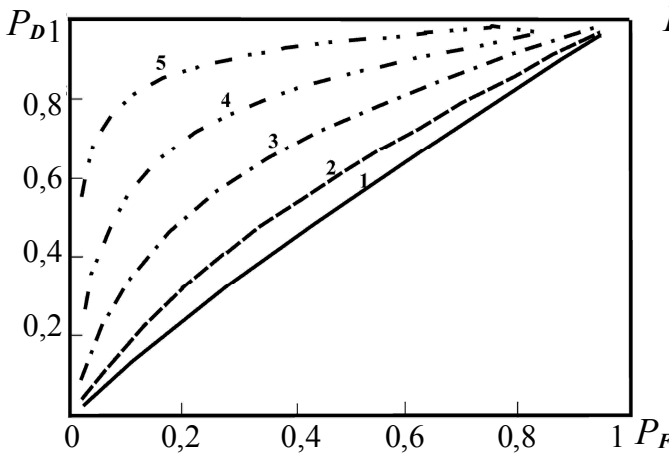


Рис. 1. Робочі характеристики алгоритму для випадку, коли спостерігаються дві цілі, симетрично рознесені на кут $\Delta\theta$ щодо нормалі до азимутальної площини антеної системи

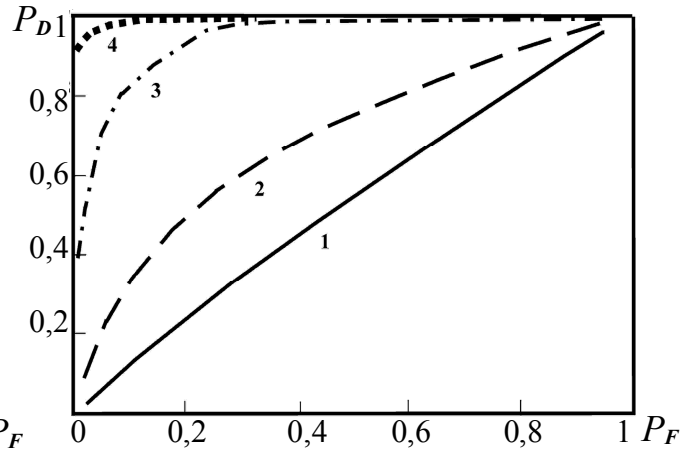


Рис. 2. Характеристики виявлення при $N=10$ і $\hat{l}_{21}^2=0$ при $\alpha=0,5$ (крива 1), $\alpha=1,0$ (крива 2), $\alpha=2,0$ (крива 3), $\alpha=4,0$ (крива 4)

Третій розділ присвячено синтезу ефективних алгоритмів спільного виявлення і оцінювання координат джерел за умови неточного знання імовірнісних моделей завад і моделей сигналів.

Математичну формалізацію неточного знання статистичних властивостей шуму представимо наступним чином. Позначимо

$$R_{kl}(\tau) = E\{\xi_k(t) \cdot \xi_l(t + \tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} G_{kl}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega, \quad (12)$$

$$G_{kl}(\omega) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi, \omega) \sin(\theta) \exp\left\{\frac{j\omega \|\vec{x}_k - \vec{x}_l\|}{v}\right\} \times \\ \times [\sin(\theta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\phi - \vartheta) + \cos(\theta) \cdot \cos(\gamma)] d\theta d\phi, \quad (13)$$

де $R_{kl}(\tau)$, $G_{kl}(\omega)$ — просторово-часові кореляційна функція і взаємний спектр шуму; $F(\theta, \phi, \omega)$ — спектр спрямованості шуму, що визначає інтенсивність шуму на частоті ω в напрямку з кутом місця θ і азимутом ϕ ; ϑ і γ — кут місця і відповідно азимут лінії $\vec{x}_k - \vec{x}_l$.

Крім того, для зручності нормування позначимо $G_{kk}(\omega) = g(\omega)$, тоді

$$G_{kl}^*(\omega) = \frac{G_{kl}(\omega)}{g(\omega)}, \quad F^*(\theta, \phi, \omega) = \frac{F(\theta, \phi, \omega)}{g(\omega)}.$$

Статистичні помилки в оцінюванні енергетичного спектру $g(\omega)$ призводить до неточного його знання

$$|g(\omega) - \tilde{g}(\omega)| \leq \Delta_g \cdot g(\omega). \quad (14)$$

Відповідно неточності у визначенні нормалізованого спектру шуму опишемо наступною нерівністю

$$\int_{\vec{\alpha}} |F^*(\vec{\alpha}, \omega) - \tilde{F}^*(\vec{\alpha}, \omega)| d\vec{\alpha} \leq \Delta_F. \quad (15)$$

Узагальнене лінійне вирішальне правило виявлення можна формалізувати наступним чином

$$y = \sum_{k=1}^L c_k(t) u_k(t) dt \underset{>}{<} h, \quad (16)$$

де $c_k(t)$ — вагові функції; h — поріг; якщо $y < h$, то приймається гіпотеза H_0 ; якщо $y > h$, то приймається гіпотеза H_1 .

Відношення шум / сигнал на вході порогового пристрою

$$\rho = \frac{\sum_{k=1}^L \sum_{l=1}^L \int_0^T \int_0^T c_k(t) \cdot R_{kl}(t - t') c_l(t') dt dt'}{\left[\sum_{k=1}^L \int_0^T c_k(t) \cdot s_k(t) dt \right]^2}. \quad (17)$$

Критерієм для порівняння лінійних алгоритмів, і отже, для вибору оптимальних алгоритмів, вважатимемо $\rho_M = \max(\rho)$, обчислене за всіма можливими ві-

дхиленнями властивостей сигналу і характеристик шуму від передбачуваних значень.

Якщо вважати, що можливі відхилення описуються нерівностями (15), то вид вагових функцій, що мінімізують максимальне відношення шум / сигнал ρ_M , визначається системою рівнянь

$$\tilde{s}_l(t) = \sum_{k=1}^L \int_0^T c_k(t') \cdot Q_{kl}(t-t') dt', \quad (18)$$

де $\tilde{s}_l(t)$ — сигнал у l -м елементі приймальної системи, знайдений за передбачуваними значеннями форми сигналу $\tilde{s}(t)$, напрямку $\tilde{\alpha}$ і положення $\tilde{x}_l$; $Q_{kl}(t)$ — оператор, відповідний якому спектру має вигляд

$Q_{kl}(\omega) = \tilde{G}_{kl}(\omega) + \nu_1 e^{j\omega \frac{\tilde{\alpha}^T(\tilde{x}_k - \tilde{x}_l)}{9}} + \nu_2(\omega) \delta_{kl}$. Тобто його можна формально розглядати як систему рівнянь для оптимальних вагових функцій при сигналі $\tilde{s}_l(t)$ і шумі зі спектром $Q_{kl}(\omega)$, рівним передбачуваному спектру $\tilde{G}_{kl}(\xi)$.

Таким чином, характерною особливістю лінійного підходу до синтезу алгоритмів обробки в умовах апіорної невизначеності є відносна простота оптимальних алгоритмів. Проте, можливість застосування цих алгоритмів обмежується наявністю помилок в описі сигналів і шумів. Експериментальні дослідження показують, що при низьких співвідношеннях сигнал / шум використання лінійних методів є неефективним. У цьому випадку слід шукати стійкі нелінійні алгоритми просторово-часової обробки сигналів. У розділі також розглянуті шляхи побудови нелінійних алгоритмів.

У четвертому розділі розглядаються просторово-часові адаптивні алгоритми виявлення сигналів на тлі нормальних шумів з невідомою взаємної спектральної матрицею. оцінка $\hat{\vec{R}}(\omega)$ взаємної спектральної матриці $\vec{R}(\omega)$ знаходиться в межах Δ — інтервалу біля істинного значення $\vec{R}(\omega)$, тобто $\|\vec{R}(\omega) - \hat{\vec{R}}(\omega)\| < \Delta$.

Тоді стійкий алгоритм буде мати вигляд

$$\int_{-\infty}^{\infty} \vec{S}^*(\omega) \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{R}}(\omega) \right)^{-1} \vec{U}(\omega) d\omega \underset{<}{>} h, \quad (19)$$

де $\nu \vec{I}$ — діагональна матриця з деяким числом ν по головній діагоналі.

Сенс алгоритму (19) полягає в тому, що неточне знання матриці $\vec{R}(\omega)$ може бути враховано при синтезі оптимального алгоритму шляхом введення в елементи антенної системи деяких білих незалежних шумів інтенсивності ν . При цьому величина ν пов'язана з помилками оцінювання $\vec{R}(\omega)$ і зростає пропорційно до них. Розглянемо ситуацію, коли на вхід антенної системи діє сигнал

$$\vec{U}(t) = \vec{S}(t) + \vec{\Psi}(t) + \vec{N}(t), \quad (20)$$

де $\vec{S}(t)$ — корисний сигнал; $\Psi(t)$ — зосереджена завада, яка є білим шумом інтенсивності q , що приходить з напрямку $\vec{\beta}$; $\vec{N}(t)$ — ізотропні білі шуми інтенсивності μ .

У цьому випадку взаємна спектральна матриця шуму має вигляд

$$\vec{R}(\omega) = \mu \vec{I} + \vec{Q}(\omega), \quad (21)$$

де $\mu \vec{I}$ — взаємна спектральна матриця незалежних білих шумів інтенсивності μ ; $\vec{Q}(\omega)$ — взаємна спектральна матриця зосередженої завади. Матрицю $\vec{Q}(\omega)$ можна представити у вигляді

$$\vec{Q}(\omega) = E \{ \vec{\Psi}(\omega) \vec{\Psi}^*(\omega) \}, \quad (22)$$

де $\vec{\Psi}(\omega)$ — вектор-стовпець з елементів $\Psi_k = \sqrt{q} \cdot e^{-j\omega \frac{\vec{\beta}^T \vec{x}_k}{g}}$, $\vec{x}_k$ — як і раніше, вектор, який визначає положення k -го елемента антенної системи приймача, g — швидкість поширення хвиль в середовищі.

Неточності у визначенні напрямку $\vec{\beta}$ на зосереджену заваду і помилки в оцінюванні інтенсивності q призводять до того, що вектор $\vec{\Psi}(\omega)$ стає відомим не точно. Тоді алгоритм (19) буде мати наступну форму запису

$$\int_{-\infty}^{\infty} \vec{S}^*(\omega) \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) \right)^{-1} \vec{U}(\omega) d\omega \underset{<}{>} h. \quad (23)$$

Якість роботи алгоритму (23) можна охарактеризувати середнім відношенням шум / сигнал:

$$\begin{aligned} \rho = & \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \vec{S}^{*T}(\omega) \cdot \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) \right)^{-1} \cdot \left(\hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) + \eta \vec{I} \right)}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \vec{S}^{*T}(\omega) \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) \right)^{-1} \vec{S}(\omega) d\omega \right]^2} \times \\ & \times \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) \right)^{-1} \cdot \vec{S}(\omega) \cdot d\omega \\ = & \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \vec{S}^{*T}(\omega) \cdot \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) \right)^{-1} \cdot \left(\hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) + \eta \vec{I} \right) \cdot \vec{S}(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \vec{S}^{*T}(\omega) \left(\nu \vec{I} + \hat{\vec{\Psi}}(\omega) \cdot \hat{\vec{\Psi}}^{*T}(\omega) \right)^{-1} \vec{S}(\omega) d\omega}, \end{aligned} \quad (24)$$

де $\eta = \Delta + \mu$.

Найкращий з алгоритмів типу (19) за неповної апріорної інформації щодо взаємної спектральної матриці шумів забезпечує виграш тим більший, чим більше проекція сигналу на передбачуваний напрямок дії зосередженої завади. Цей виграш зростає зі збільшенням інтенсивності зосередженої завади. Базуючись на методі ортогонального розкладання випадкових процесів побудовано ефективний алгоритм оброблення сигналів, який забезпечує за відносно високих співвідношеннях сигнал / шум можливість виділення корисних сигналів з розділенням на порядок вищим, ніж це вдається при апертурному аналізі просторових спектрів. На рис. 3 та 4 показано розподіл потужності сигналів за кутами в реалізації, що спостерігається при співвідношенні сигнал / шум 40 дБ отриманий за допомогою запропонованого алгоритму і просторовий спектр при традиційному об-

робленні. Наочно видно переваги методу «надрозділення». Помилки в оцінці частотного розподілу сигналів в розглянутому алгоритмі можуть виникати при неадекватному виборі дискретних точок представлення моделі, а також у разі, коли число джерел дорівнює або перевищує число точок розкладання кореляційної функції.

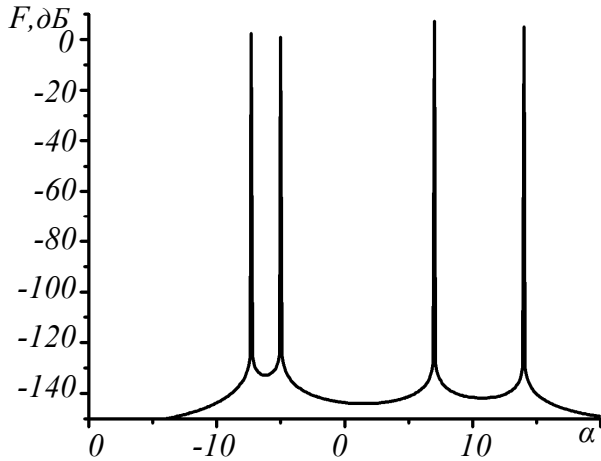


Рис. 3. Оцінка просторового розподілу потужності сигналів за кутами, яка отримана методом «надрозділення»

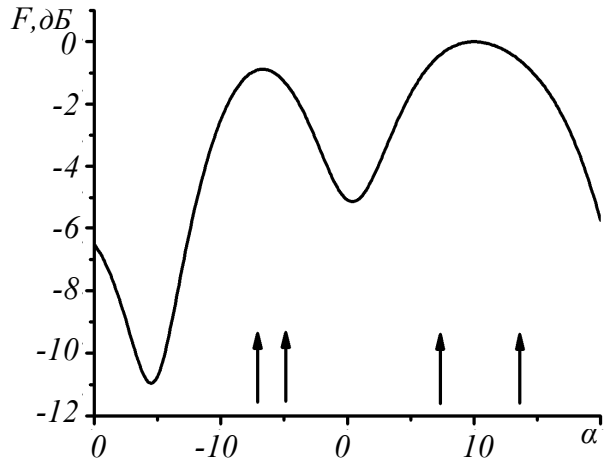


Рис. 4. Фур'є-оцінка розподілу потужності сигналів за просторовими частотами

У п'ятому розділі надано результати експериментальних досліджень адаптивних робастних алгоритмів оцінювання просторово-часових спектрів.

Фільтри, що входять до складу моделі просторово-часової обробки сигналів, моделювалися за допомогою двосторонніх трансверсальних фільтрів (тобто фільтрів без зворотних зв'язків). Модель системи просторово-часової обробки сигналів показана на рис. 5.

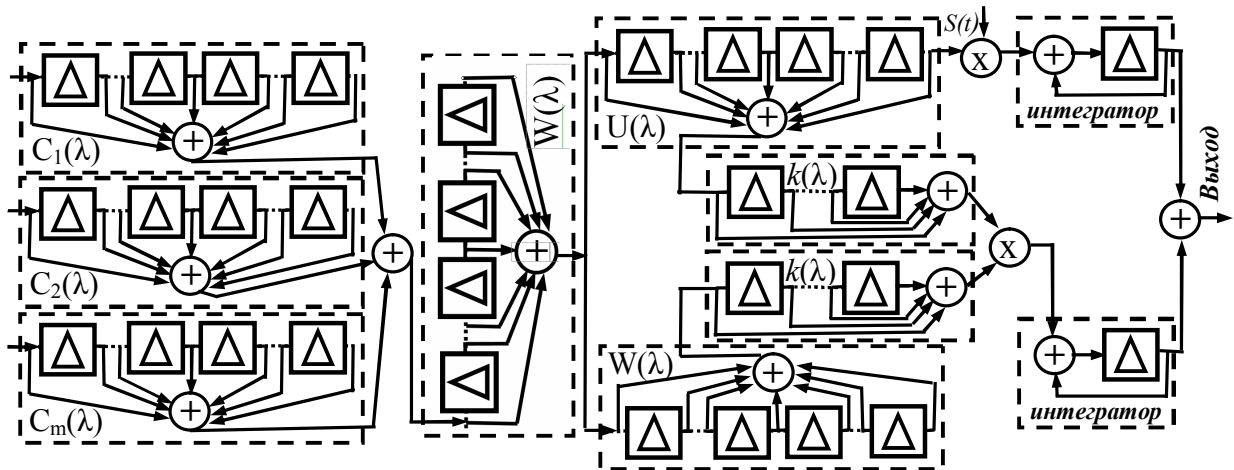


Рис. 5. Цифрова модель системи просторово-часової обробки сигналів

Група фільтрів, що обведена на рис 5 пунктиром, замінена одним трансверсальним фільтром $u(\lambda)$, що дозволяє спростити моделювання. Для моделювання трансверсальних фільтрів більш зручно подання у часовій області, тому представимо їхні імпульсні характеристики у вигляді:

$$C_k(t) = \int_{-\pi}^{\pi} C_k(\lambda) e^{j\lambda t} \frac{d\lambda}{2\pi}, \quad (25)$$

$$W(t) = \int_{-\pi}^{\pi} |W(\lambda)| \cos(\lambda t) \frac{d\lambda}{2\pi}, \quad (26)$$

$$u(t) = \int_0^T \frac{|W(\lambda)|}{1 + f_k(\lambda) |W(\lambda)|^2} \frac{d\lambda}{2\pi}, \quad (27)$$

$$k(t) = \int_{-\pi}^{\pi} k(\lambda) e^{j\lambda t} \frac{d\lambda}{2\pi}. \quad (28)$$

Оскільки в загальному випадку структура пристрою просторово-часової обробки сигналів, що наведена на рис 5, відповідає випадку, коли час спостереження дорівнює нескінченності, представляє інтерес за яких обсягів вибірки це припущення справедливе. Тому, поряд з моделюванням обчислювалися ймовірності помилок 1-го і 2-го роду:

$$\alpha \sim 1 - F \left\{ \frac{\ln(\eta_1 - E\{\mathfrak{T}^0\})}{\sqrt{\sigma^2\{\mathfrak{T}^0\}}} \right\}, \quad (29)$$

$$\beta \sim 1 - F \left\{ \frac{\ln(\eta_1 - E\{\mathfrak{T}^1\})}{\sqrt{\sigma^2\{\mathfrak{T}^1\}}} \right\}, \quad (30)$$

де α и β — ймовірності хибної тривоги і пропуску сигналу; $E\{\mathfrak{T}^i\}$ і $\sigma^2\{\mathfrak{T}^i\}$, $i = 0, 1$, відповідно середнє і дисперсія функціоналу відносини правдоподібності $\mathfrak{T}$ за умови справедливості гіпотези H_i . Величина порога обчислюється за формулою

$$\ln(\eta_1) = \ln(\eta) + \frac{N}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \ln(1 + f_\alpha(\lambda) |W(\lambda)|^2) \frac{d\lambda}{2\pi} + \frac{N}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|s(\lambda)|^2 |W(\lambda)|^2}{1 + f_\alpha(\lambda) |W(\lambda)|^2} \frac{d\lambda}{2\pi}, \quad (31)$$

при цьому функціонал відносини правдоподібності має вигляд

$$\begin{aligned} \mathfrak{T} = L_R + L_q = N \int_{-\pi}^{\pi} \frac{s^*(\lambda) |W(\lambda)|^2}{1 + f_\alpha(\lambda) |W(\lambda)|^2} \sum_{l=1}^m x_l(\lambda) C_l(\lambda) \frac{d\lambda}{2\pi} \\ + \frac{N}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f_\alpha(\lambda) |W(\lambda)|^2}{1 + f_\alpha(\lambda) |W(\lambda)|^2} \left| \sum_{l=1}^m x_l(\lambda) C_l(\lambda) \right|^2 \frac{d\lambda}{2\pi}. \end{aligned} \quad (32)$$

При моделюванні енергетичні спектри точкових завад $f_{\mu_1}(\lambda)$ і $f_{\mu_2}(\lambda)$, а також сигналу $f_{\alpha}(\lambda)$ мали вигляд, показаний на рис. 6. Детермінована компонента сигналу відсутня. Потужність точкових джерел завад залишалася незмінною, а потужність внутрішніх шумів $n_1(t)$ і $n_2(t)$ змінювалася від 0,2 до 1,0. На рис. 7 представлено сімейство робочих характеристик пристрою просторово-часової обробки сигналів для коефіцієнта кореляції між $\mu_1(t)$ та $\mu_2(t)$ рівного нулю. Крім цього сімейства відрізняються потужністю сигналу.

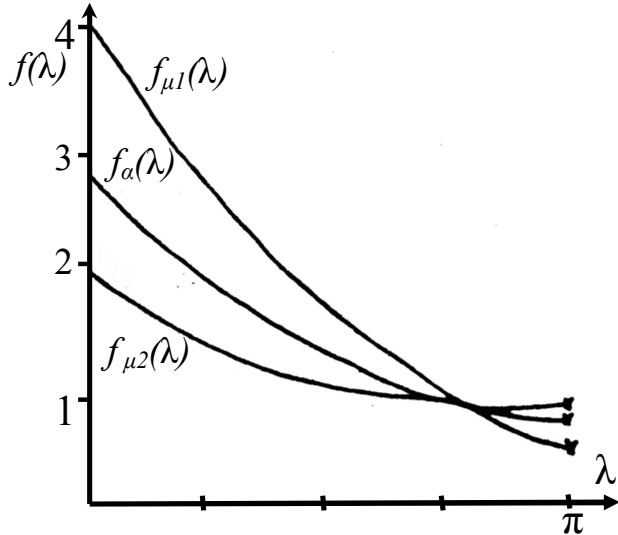
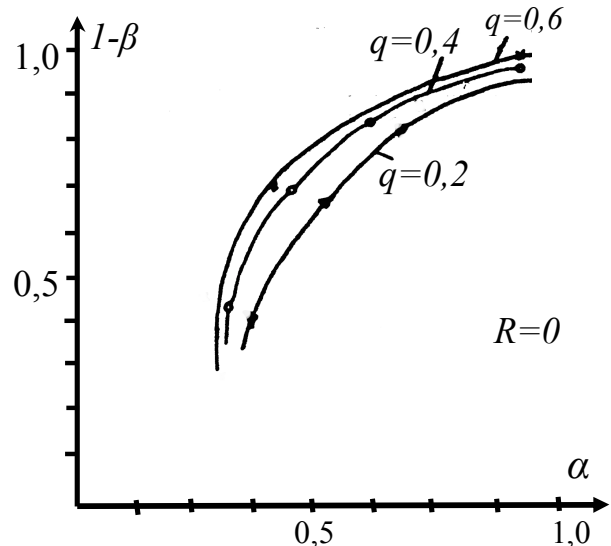
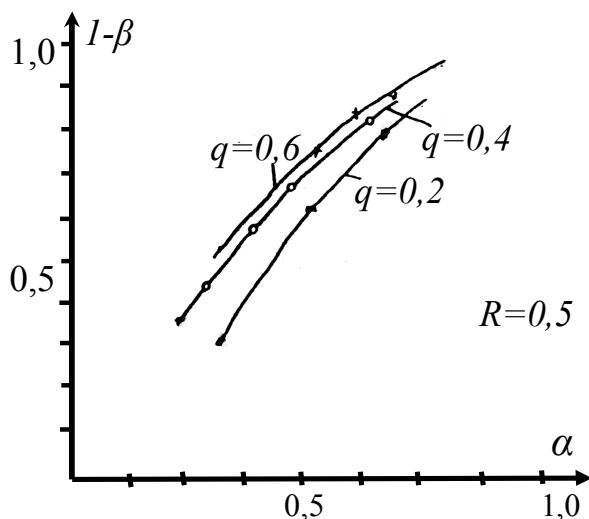
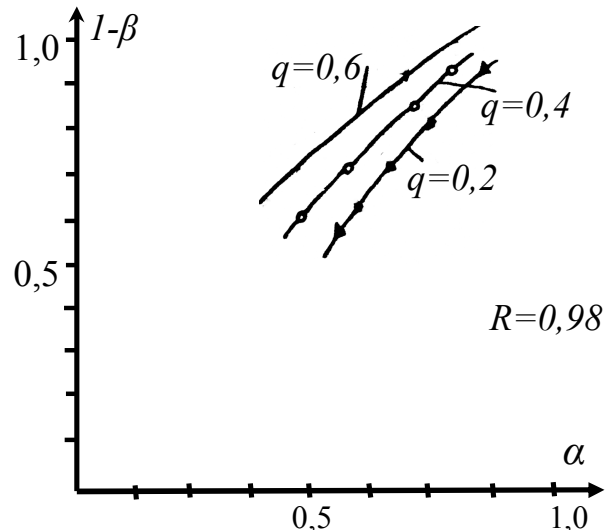


Рис. 6. Енергетичні спектри сигналів і завад

Рис. 7. Робочі характеристики системи просторово-часової обробки для $R = 0$

На рис. 8 і рис. 9 наведено аналогічні сімейства для коефіцієнтів кореляції 0,5 і 0,98 відповідно.

Рис. 8. Робочі характеристики системи просторово-часової обробки для $R = 0,5$ Рис. 9. Робочі характеристики системи просторово-часової обробки для $R = 0,98$

Розглянута система може бути використана для виявлення плоских сигнальних хвиль, коли сигнал містить як детерміновану, так випадкову складову, що звичайно має місце в гідроакустичних та інших каналах. Незважаючи на те, що синтез пристрою просторово-часової обробки здійснювався на основі асимптотичних співвідношень справедливих для нескінченного часу спостереження, гар-

ну згоду теоретичних і експериментальних результатів досягається для вибірок обсягу $n = 25$. Розроблена модель дозволяє оперативно для заданих сигналів і завад розрахувати необхідний час спостереження, для забезпечення необхідної якості виявлення.

У додатках наведені акти впровадження теоретичних і практичних результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язана актуальна науково-прикладна задача удосконалення методів комплексного оброблення стохастичної інформації мультисенсорних радіоелектронних систем спостереження за просторово розподіленими джерелами, що дозволило можливість підвищення надійності їхньої роботи у нестаціонарній заводській обстановці. Під час розв'язання цієї задачі отримано наступні наукові результати.

На основі скінченновимірної рекурентної процедури розроблено метод інваріантного оцінювання просторового розподілу об'єктів, у якому вирішальні правила адаптивно змінюються в міру накопичення статистичної інформації про об'єкти і завади.

Впровадження цього методу стало можливим завдяки запропонованому стохастичному критерію просторового розділення джерел сигналів на основі їхніх ймовірнісних моделей, в якому, на відміну від відомих, не накладаються обмеження на структуру алгоритму обробки і на властивості завад. Ефективність методу доведено на прикладі розв'язання задачі оцінки просторових координат центроїда групи просторово-нерозділених об'єктів, у якому адаптивно змінювалися інтервали накопичення сигналу при змінах стохастичних властивостей завад, забезпечуючи тим самим високу стійкість роботи алгоритмів обробки сигналів.

Запропоновано використовувати комбінацію лінійних і нелінійних робастних алгоритмів в умовах дії нестаціонарних завад, що дозволило створювати алгоритми, які не втрачають працездатності при низьких співвідношеннях сигнал / шум, та встановлено межі, за якими можлива заміна просторово-спектральної матриці завад на вибірккову матрицю для отримання квазіоптимальних оцінок просторово-часових спектрів.

Найбільш важливими для практики результатами, які отримані в дисертації, є наступні.

Розроблено рекомендації по визначенню довжини навчальної вибірки при проведенні спостережень за групою просторово нерозділених джерел сигналів в умовах апріорної невизначеності щодо їхнього просторового розподілу і ймовірнісних характеристик завад. Завдяки цьому у реальному часі отримано оцінки просторово-часових спектрів, у яких не виникає хибних спектральних викидів при зниженні співвідношень сигнал / шум нижче критичних значень, як це має місце у відомих адаптивних системах, а також стало можливим розрахувати необхідний час спостереження з метою забезпечення необхідної якості виявлення.

На основі квазіоптимального вирішального правила синтезована структура пристрою просторово-часової обробки сигналів, яка забезпечує згоду теоретичних і експериментальних результатів вже при обсягах вибірок близьких до 25 відліків.

Дані рекомендації щодо побудови спеціалізованого обчислювального пристрою, призначеного для реалізації запропонованих методів оброблення сигналів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сытник О.В. Алгоритм оценки параметров центраида группы неразрешенных объектов / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Системи обробки інформації. Харківський університет повітряних сил.— Харків, 2010. — Вип. 5(86). — С. 132 —135.
2. Сытник О.В. Адаптивная пространственно-временная обработка сигналов устойчивая к коррелированным помехам / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. — Харьков, 2010. — Вып. 163. — С. 243 —247.
3. Сытник О.В. Ортогональная пространственно-временная обработка сигналов в адаптивных приемных системах / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Системи управління навігації та зв'язку. Радіолокація і радіонавігація. / Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління.— Київ, 2010. — Вип. 2(14). — С. 67 — 69.
4. Сытник О.В. Алгоритм адаптации пространственно-временной селективной системы в условиях нестационарных помех / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. — Харьков, 2011. — Вып. 164. — С. 5 — 10.
5. Сытник О.В. Пространственная селекция широкополосных источников по собственным числам ковариационной матрицы / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. — Харьков, 2012. — Вып. 171. — С. 210 — 215.
6. Сытник О.В. Робастная пространственно-временная обработка сигналов в коррелированном шуме / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // 20-th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2010). 13-17 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine. — P. 1233-1234.
7. Sytnik O.V. Invariant to the Correlated Noise Adaptive Signal Processing Algorithms / Sytnik O.V., Kartashov V.A., Suprun A.A. // IEEE 11-th International Conference “The Experience of designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”. (CADSM’ 2011) Lviv, Polytechnic National University. 23-25 February, 2011 Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine. — P. 112-113.
8. Сытник О.В. Стохастическая оценка параметров группы пространственно-неразрешенных объектов / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Праці III Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів». 24-27 травня 2011 р. м. Черкаси, Україна. — С. 165 — 167.

9. Супрун А.А. Робастный алгоритм подавления помех в сканирующей антенной решетке/ А.А. Супрун, Д.Н. Куля // 7-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011». 11-15 апреля 2011 г. Севастополь, Украина. – С. 54-55.

10. Супрун А.А. Адаптивная пространственно-временная обработка сигналов на основе нейронных сетей/ А.А. Супрун, Гурьев В.Ю. // Труды 15-го Международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке". 18 – 20 апреля 2011 г. Харьков, ХНУРЭ, Украина. – С. 58-59.

11. Сытник О.В. Рекуррентный алгоритм обработки сигналов сканирующей антенны / О.В. Сытник, В.М. Карташов, А.А. Супрун // Сборник научных трудов 4-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития." Т.1. Конференция Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии". - Харьков. - 2011. – С. 258-260.

12. Супрун А.А. Адаптивный фильтр в контуре управления сканирующей антенной решетки / А.А. Супрун, В.Ю. Гурьев // Труды 15-го Международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке". 18 – 20 апреля 2011 г. Харьков, ХНУРЭ, Украина. – С. 167-168.

АНОТАЦІЯ

Супрун О. О. Удосконалення методів виявлення, розділення та оцінки числа джерел випромінювання стохастичних сигналів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, 2013.

Дисертацію присвячено розв'язанню задачі удосконалення методів комплексної обробки стохастичною інформації мультисенсорних радіоелектронних систем спостереження за просторово розподіленими джерелами сигналів з метою підвищення надійності їх роботи у нестационарній заводській обстановці.

У роботі запропоновано стохастичний критерій просторового розділення джерел сигналів на основі їхніх імовірнісних моделей. Розроблено метод оцінки просторових координат центроїда групи просторово нерозділених об'єктів.

Удосконалено методи синтезу стійких квазіоптимальних вирішальних правил на основі рекурентних процедур обчислення оцінок просторово-спектральної матриці спостережуваних процесів.

Розроблено ефективні обчислювальні процедури у алгоритмах оптимальної обробки сигналів при вирішенні прикладних задач просторово-часової обробки сигналів в адаптивних антенних решітках.

Ключові слова: стохастична інформація, мультисенсорні радіотехнічні системи спостереження, імовірнісні моделі процесів, адаптивна антенна решітка, спектральне оцінювання, алгоритм.

АННОТАЦИЯ

Супрун А. А. Усовершенствование методов обнаружения, разрешения и оценки числа источников излучения стохастических сигналов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 - радиотехнические и телевизионные системы. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, 2013.

Диссертация посвящена решению задачи усовершенствования методов комплексной обработки стохастической информации мультисенсорных радиоэлектронных систем наблюдения за пространственно распределенными источниками сигналов с целью повышения надежности их работы в нестационарной помеховой обстановке.

Впервые при синтезе оптимальных радиотехнических систем наблюдения за источниками сигналов и оптимальной пространственно-временной обработки информации многопозиционных мультисенсорных приемных систем разработан метод инвариантного оценивания пространственного распределения объектов, основой которого являются стохастические конечномерные рекуррентные процедуры, адаптивно изменяющие решающие правила по мере накопления информации об объектах и помехах.

В работе предложен стохастический критерий пространственного разрешения источников сигналов на основе их вероятностных моделей. Разработан метод оценки пространственных координат центроида группы пространственно неразделенных объектов, который отличается от известных тем, что позволяет адаптивно изменять интервалы накопления сигнала при изменениях стохастических свойств помех, чем обеспечивает высокую устойчивость работы синтезированных на его основе алгоритмов.

Усовершенствованы методы синтеза квазиоптимальных решающих правил на основе рекуррентных процедур вычисления оценок пространственно-спектральной матрицы наблюдаемых процессов и установлены границы, при которых возможна замена ее модели на выборочную матрицу, что позволило создать класс алгоритмов пространственно-временной обработки с предельно возможным разрешением при условии их инвариантности относительно помех.

Разработаны эффективные вычислительные процедуры в алгоритмах оптимальной обработки сигналов при решении прикладных задач пространственно-временной обработки сигналов в адаптивных антенных решетках. Предложена математически обоснованная процедура оценивания ошибок в структуре стохастических сигналов, учитывающая влияние аппаратных погрешностей.

Ключевые слова: стохастическая информация, мультисенсорные радиотехнические системы наблюдения, вероятностные модели процессов, адаптивная антенная решетка, спектральное оценивание, алгоритм, пространственно-временная обработка сигналов, робастных алгоритм.

ABSTRACT

Suprun A.A. Improving the methods of detection, resolution, and estimation of the number of radiation sources of stochastic signals.– Manuscript.

Thesis for a candidate degree of technical sciences, specialty 05.12.17 - radio and television systems. Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, 2013.

The thesis is devoted to solving the problem of optimal synthesis of complex signal processing at the stochastic information multisensor radar surveillance systems for spatially distributed signal sources to improve the reliability of their work in non-stationary noise conditions.

The paper presents the stochastic criterion spatial separation signal sources based on their probabilistic models. A method of estimating the spatial coordinates of centroid spatial unrequited objects.

Improved methods for the synthesis of stable quasi decision rules based on recursive procedures of Estimation space-spectral matrix of the observed processes.

The effective computational procedures in the optimum signal processing algorithms in solving applied problems of space-time signal processing in adaptive antenna array.

Keywords: stochastic information, multi-radio monitoring system, the probabilistic model of the processes, the adaptive antenna array, spectral estimation, the algorithm.

Підписано до друку 10.12.2012 р. Формат 60×84 1/16.

Спосіб друку – різнографія.

Ум. друк. арк. 1,2. Тираж 150 прим.

Замовлення № 10-04-13. Ціна договірна.

Харків, 61166, просп.. Леніна, 14, ХНУРЕ

Віддруковано в навчально-науковому
Видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ