

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

ВОРОНІН ВІТАЛІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 551.51: 621.391.8

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕШКОД
СИСТЕМ АКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Карташов Володимир Михайлович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, завідувач кафедри
медіаінженерії та інформаційних
радіоелектронних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Руженцев Микола Вікторович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський
авіаційний інститут» МОН України, провідний
науковий співробітник ПНДЛ радіотехнічних і
навігаційних систем

доктор технічних наук, с. н. с.
Костиця Олександр Олексійович,
Харківський національний університет
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба МО
України, начальник науково-дослідної
лабораторії

Захист відбудеться «11» грудня 2019 року о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

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

Автореферат розісланий «08» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Розробка ефективних засобів моніторингу атмосфери в інтересах метеорології, авіації, екології призвела до створення дистанційних неконтактних методів зондування атмосфери. Одним з перспективних методів дистанційного зондування є акустичний метод, оснований на випромінюванні в атмосферу акустичних хвиль і визначенні характеристик атмосфери за параметрами сигналу, розсіяного природними турбулентними неоднорідностями.

Системи акустичного зондування (САЗ) атмосфери дозволяють вимірювати вертикальні профілі швидкості вітру, параметри турбулентності і можуть використовуватися при вирішенні багатьох наукових і прикладних задач.

Сучасною тенденцією розвитку техніки обробки сигналів САЗ є перехід від антен з громіздкими звукозахисними укриттями до адаптивних методів придушення перешкод і формування зондуючого сигналу. Застосування адаптивного придушення перешкод в реальному часі дозволить ефективно використовувати САЗ в умовах присутності різних активних техногенних і атмосферних перешкод і забезпечить підвищення заводо захищеності систем акустичного зондування.

При розробці методів цифрової обробки сигналів, методів придушення перешкод в різних радіоелектронних системах останнім часом широко застосовуються моделі лінійного передбачення. Моделі авторегресії (АР) дозволяють синтезувати алгоритми обробки випадкових процесів і здійснювати оптимальну фільтрацію сигналу на фоні корельованої перешкоди. Широко використовуються також параметричні методи спектрального оцінювання.

Акустичні перешкоди, що діють на САЗ, нестационарні в часі і досить швидко змінюють свої характеристики, які залежать від типу джерела перешкод, характеру руху джерела (наприклад, зліт, посадка, рулежка літака в районі аеродрому), від його віддаленості до приймальних антен САЗ і ряду інших чинників. Тому найбільш ефективним засобом придушення наявних акустичних перешкод є адаптивні фільтри.

Таким чином, актуальною є тема дисертації, в якій вирішується науково-прикладне завдання удосконалення методів адаптивного придушення акустичних перешкод фільтрами лінійного передбачення в системах акустичного дистанційного зондування атмосфери.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота пов'язана з дослідженнями, виконаними в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) з держбюджетної НДР №312, рег. номер 011U002541 «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку» (2015-2016 роки), у якій здобувач був виконавцем.

Мета і завдання досліджень

Метою досліджень є удосконалення методів адаптивного придушення активних і пасивних акустичних перешкод в системах акустичного зондування атмосфери, що дозволяють підвищити ефективність їх функціонування в умовах швидкоплинної перешкодової обстановки.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися такі задачі:

1. Аналіз відомих методів і алгоритмів захисту содарів від перешкод.
2. Аналіз і узагальнення відомих моделей авторегресії. Розвиток теорії комплексних моделей авторегресії вузькосмугових випадкових сигналів.
3. Розробка і удосконалення конструктивних алгоритмів генерації випадкових корисних сигналів і корельованих завад із заданими спектральними властивостями з використанням дійсної та комплексної моделей авторегресії.
4. Дослідження ефективності використання моделей авторегресійних фільтрів прямої реалізації та решітчастих структур для синтезу адаптивних пристроїв придушення акустичних перешкод в содарах.
5. Аналіз якісних показників алгоритмів адаптивного придушення перешкод для широкого класу потужних акустичних перешкод, що мають місце при роботі содарів. Аналіз впливу активних і пасивних акустичних шумів і перешкод на оцінки центральної частоти спектру розсіяного сигналу.

Об'єктом дослідження є процес зондування атмосфери акустичними хвилями.

Предметом дослідження є адаптивні фільтри лінійного передбачення для придушення нестационарних акустичних перешкод в содарах.

Методи дослідження. У роботі використані методи теорії лінійних систем, різницевих лінійних рівнянь, методи статистичного моделювання, прикладного аналізу випадкових процесів, чисельні методи аналізу, методи статистичної теорії радіосистем.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Виконано аналіз і узагальнення відомих моделей авторегресії. Отримали подальший розвиток математичні подання теорії комплексних моделей авторегресії вузькосмугових випадкових акустичних сигналів і перешкод, які відрізняються тим, що їх квадратурна обробка може бути описана і реалізована на основі комплексної моделі АР.

2. Запропоновано нові авторегресійні моделі генерації комплексних випадкових сигналів із заданими спектральними характеристиками, що відрізняються від використовуваних раніше моделей на основі різницевого рівняння більш високою точністю відтворення заданих характеристик сигналів, універсальністю, стаціонарністю.

3. Удосконалено метод захисту від перешкод систем акустичного зондування атмосфери на основі адаптивних фільтрів лінійного передбачення, що відрізняється адаптивним вибором частоти зондуючого сигналу шляхом аналізу спектру потужних акустичних перешкод і обґрунтованим використанням алгоритмів їх адаптації.

4. Удосконалено методику експериментального дослідження ефективності придушення акустичних перешкод адаптивними решітчастими фільтрами з завадовим каналом, що відрізняється урахуванням існуючих характеристик основного і завадового каналів. Розроблено алгоритм сумісної обробки і інтерпретації результатів зондування в системі з акустичного і радіоакустичного локаторів. Ефективність алгоритмів підтверджена результатами оцінювання характеристик атмосфери на фоні потужних акустичних перешкод від різних типів сучасних авіалайнерів, автотрас, дощу, швидкого поїзда.

Практичне значення отриманих результатів

Використання в роботі комплексних математичних моделей лінійного передбачення акустичних сигналів і завад дозволяє удосконалити алгоритми обробки акустичних сигналів в САЗ і підвищити їх швидкодію. Запропоновані математичні моделі розсіяних акустичних сигналів і каналів розсіювання дозволяють створювати з їх використанням апаратно-програмні пристрої – імітатори розсіяних сигналів або інформаційних локаційних каналів систем акустичного зондування, які вкрай необхідні при випробуваннях наявної або проекрованої апаратури. З використанням імітаторів може визначатися працездатність апаратури, реальні значення показників якості відокремлених блоків і здійснюватися метрологічна атестація станцій в цілому. Аналіз систем та їх окремих елементів на етапі проектування содарів відтепер може проводитися теоретично – аналітичним шляхом або методом півнатурного фізичного моделювання.

Запропоновані методи придушення перешкод при їх практичній реалізації в содарах дозволять підвищити їх завадозахищеність і забезпечать можливість роботи в місцях з несприятливою завадовою обстановкою, наприклад в аеропортах. При цьому погрішності оцінювання частоти розсіяного сигналу зменшуються, а отже підвищується точність визначення характеристик атмосфери.

Ефективність досліджених методів адаптивного придушення перешкод на решітчастих фільтрах доводить, що вони можуть бути використані при просторово-часовій обробці сигналів систем акустичного придушення перешкод в содарах з ФАР.

Розроблені методи і алгоритми використані при виконанні НДР №312, рег. номер 011U002541 «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку» (2015-2016 роки), НДР №327, рег. номер 0119U001404 «Розроблення системи комплексної обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначення їх координат та параметрів руху», а також в навчальному процесі кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ (в курсі «Акустичні системи зондування неоднорідних середовищ»), що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача

Основні наукові результати, які викладені в дисертації, отримані здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі.

У роботі, присвяченій розробці та аналізу комплексних моделей лінійного передбачення вузькосмугових перешкод [1] здобувачем виконані основні теоретичні дослідження принципів розрахунку параметрів моделей, виведені нові вирази для оцінки параметрів комплексної моделі через параметри спектрів. У роботі [2] автором проаналізовано особливості застосування комплексних систем дистанційного зондування атмосфери. В роботі [3] автором виконані чисельні розрахунки і моделювання з використанням комп'ютера, а також проведена обробка результатів експериментів. У роботах [4-5] автором проведено безліч імітаційних експериментів, які доводять ефективність застосування використовуваних методів для придушення корельованих акустичних перешкод. В роботі [6] автором розраховані оцінки частоти корисного сигналу при придушенні акустичних перешкод від різних джерел.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на 9-ти міжнародних

наукових конференціях і молодіжних форумах: 21-й і 23-й Міжнародні молодіжні форуми "Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті" (Харків, 2017, 2019); Інформаційні системи і технології: 5 Міжн. наук.-техн. конф., 12-17 вересня 2016 р., Коблево; Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS / ATM: Тези доповідей наук.-техн. конф., 21-23 листопада 2016 р., м. Київ; Сучасні проблеми и досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікації та інформаційних технологій: Тези доповідей VIII наук.-практ. конф., 21-23 вересня 2016 р., м. Запоріжжя.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 15 наукових роботах: 4 статті – у фахових виданнях України; 2 статті – в зарубіжних журналах (індексуються в наукометричній базі Scopus); 9 тез доповідей у матеріалах міжнародних форумів і конференцій.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і переліку посилань. Дисертація містить 173 сторінки, 34 рисунка, 28 таблиць, список джерел з 123 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та сформульовано задачі дисертаційного дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про публікації автора за темою дисертації.

У першому розділі зроблено аналіз існуючих САЗ, методів їх захисту від акустичних перешкод і методів вимірювання параметрів атмосфери.

В останні десятиріччя розвитку теорії і техніки дистанційного зондування атмосфери з використанням акустичних хвиль приділяється значна увага. САЗ дозволяють вимірювати найбільш важливі характеристики атмосферного прикордонного шару – висотні профілі швидкості вітру, температури, параметрів турбулентності. Однак сучасний стан теорії і техніки систем акустичного зондування не дозволяють в повній мірі реалізувати великі потенційні можливості розглянутого методу по ідентифікації різних станів атмосфери. Потреби практики вимагають поліпшення основних показників якості САЗ: підвищення точності вимірювань, завадозахищеності.

Особливо актуальною є задача підвищення ефективності функціонування САЗ в умовах несприятливого впливу зовнішнього середовища. Відповідно до цього необхідно розробити адаптивні і інваріантні методи цілеспрямованої побудови (зміни, оптимізації) структур і параметрів станцій зондування та зондуючих сигналів, з урахуванням того, що на роботу систем акустичного зондування найбільший вплив робить перешкодова обстановка, що складається в конкретному районі в період проведення зондування.

Огляд літератури за темою дисертаційної роботи показує, що методи адаптивної просторово-часової обробки сигналів, які широко застосовуються і досліджуються в радіолокації, практично не використовуються в акустичному зондуванні. Тим часом, використання просторово-часової обробки сигналів може бути досить перспективним напрямком у створенні сучасних систем акустичного зондування атмосфери. Завдання вдосконалення адаптивних методів обробки акустичних сигналів, з урахуванням специфіки наявних акустичних перешкод і умов функціонування содарів, є актуальними в даний час і вимагають додаткових досліджень.

У другому розділі розглянуті питання побудови математичних моделей акустичних сигналів і перешкод, що мають місце в САЗ.

Акустичні перешкоди характеризуються значною різноманітністю за походженням. Спектральний склад перешкод, які часто представляють собою адитивну суміш коливань від різних джерел, також може бути дуже різноманітний і складний. При дослідженні методів перешкодозахищеності содарів і визначенні їх потенційних можливостей, доцільно мати імітаційні моделі таких перешкод.

У роботі розроблені методи моделювання акустичних перешкод і генерації випадкових дійсних і комплексних імітаційних сигналів методом формуючих фільтрів на основі моделей лінійного передбачення. В якості основних характеристик сигналів використовуються ширина смуги і центральні частоти піків спектральної щільності потужності (СЩП).

Запропонований метод отримання випадкових процесів з одномодовою і багатомодовою формами СЩП вузькосмугових і широкосмугових випадкових процесів може бути використаний для отримання імітаційних процесів при аналізі ефективності способів придушення акустичних перешкод в содарах, а також в інших завданнях, що вимагають попереднього формування імітаційних випадкових коливань з заданими статистичними і спектральними властивостями.

В основу моделі АР покладена кореляція відліку випадкового процесу в поточний момент часу з деяким кінцевим або нескінченним числом відліків в попередні моменти часу. Кореляційні зв'язки дозволяють здійснити регресію поточного відліку на попередні відліки

$$x[t] = \sum_{j=1}^p \Phi[j]x[t-j] + a[t], \quad (1)$$

де $\Phi[j]$ – коефіцієнти АР; $a[t]$ – некорельовані випадкові підрахунки; p – порядок моделі АР. Із (1) виходить система $p+1$ рівнянь для обчислення невідомих коефіцієнтів АР

$$R[i] - \sum_{j=1}^p \Phi[j]R[j-i] = 0, \quad i = 1 \div p, \quad (2)$$

де $R[i] = E\{x[t]x[t-i]\}$ – значення функції кореляції випадкового процесу.

Рішення системи рівнянь (2) можна представити в матричному вигляді

$$\vec{\Phi} = R_p^{-1} \vec{R}. \quad (3)$$

Параметрична оцінка спектра по моделі АР обчислюється за допомогою виразу

$$P(f) = D_a / \left| 1 - \sum_{i=1}^p \Phi[i]e^{-ji2\pi ft} \right|^2. \quad (4)$$

Для доказу можливості використання моделей АР при придушенні акустичних перешкод, здійснювалося порівняння СЦП, отриманих корелограмним і параметричним методами (рис. 1).

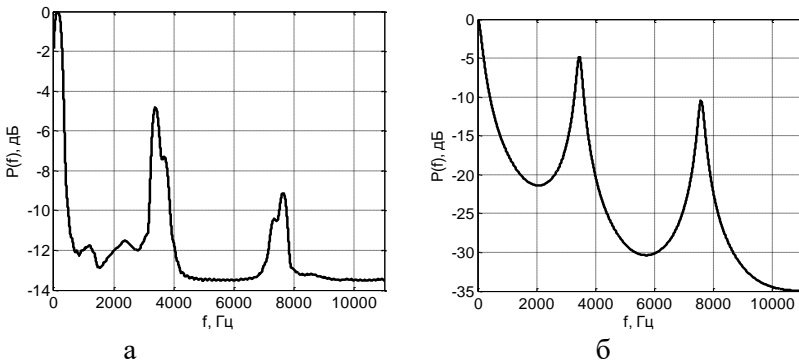


Рисунок 1 – Спектри шумів лайнера Boeing 737:
а – корелограмний метод; б – параметричний метод

Порівняння графіків різних оцінок СЦП шумів лайнера Boeing 737 показує, що розташування на осі частот основних піків у обох оцінок збігається, а гострі піки спектру вказують на його приналежність до процесів АР.

Комплексні коріння характеристичного рівняння АР визначаються виразом

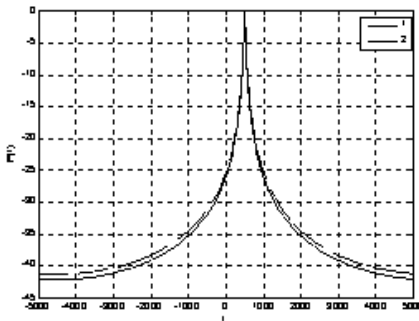
$$\hat{c}[i] = \exp(-\pi\Delta f_i T + j2\pi f_i T), \quad (5)$$

де f_i – власна частота моделі АР, що відповідає i -тому піку СЦП; Δf_i – ширина смуги цього піка.

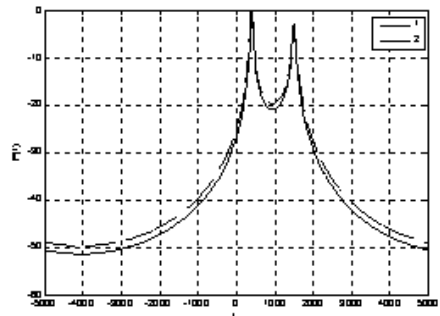
У роботі знайдені вирази, що зв'язують параметри СЦП і комплексних коефіцієнтів АР. Відповідні формули для $p=1, 2$ мають вигляд

$$\hat{\Phi}[1,1] = \hat{c}[1,1]; \hat{\Phi}[2,1] = \hat{c}[2,1] + \hat{c}[2,2], \hat{\Phi}[2,2] = -\hat{c}[2,1]\hat{c}[2,2]. \quad (6)$$

Результати моделювання комплексних процесів авторегресії АР(1) і АР(2), що характеризуються одномодовим і двухмодовим спектрами, при наступних характеристиках СЦП: для моделі АР(1) – $f_1 = 500 \text{ Гц}$, $\Delta f_1 = 50 \text{ Гц}$, для моделі АР(2) – $f_1 = 400 \text{ Гц}$, $\Delta f_1 = 50 \text{ Гц}$, $f_2 = 1500 \text{ Гц}$, $\Delta f_2 = 70 \text{ Гц}$ представлені на рис. 2. Як видно з цих графіків, забезпечується гарний збіг теоретичної і вибіркової СЦП, отриманих на основі комплексних моделей АР(1) і АР(2).



а



б

Рисунок 2 – Теоретичні і вибіркові спектри:
а - одномодові спектри, б - двухмодові спектри

У **третьому розділі** на основі моделі АР синтезовані пристрої для придушення активних і пасивних акустичних перешкод в САЗ.

На рис. 3 представлений АР фільтр передбачення, алгоритм дії якого описується виразом (1). Він складається з лінії затримки, підсилювачів з коефіцієнтами підсилення $-\Phi[j]$, $1 \leq j \leq p$, і суматора. Помилки передбачення на виході цього фільтра будуть некорельованими, а дисперсія помилки передбачення матиме мінімальне значення, якщо коефіцієнти АР знайдені з рівняння (3).

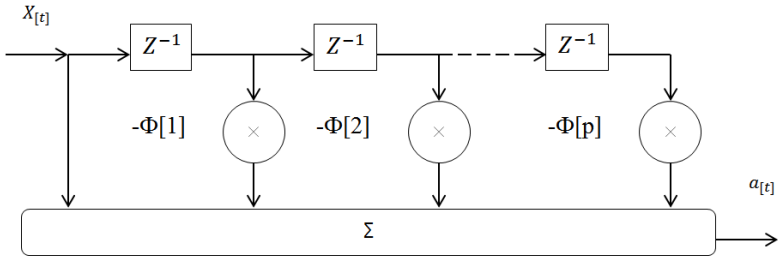
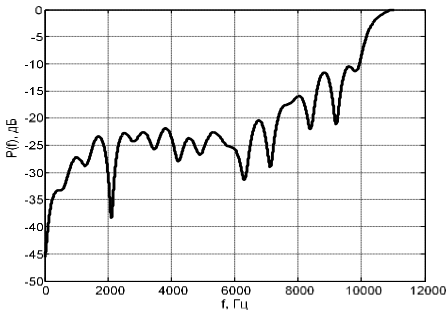
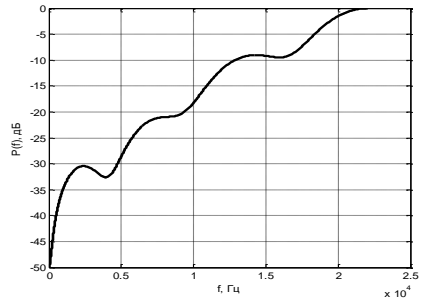


Рисунок 3 – Схема відбілюючого АР фільтра прямої реалізації

АР фільтр передбачення виконує функцію відбілюючого фільтра. На вхід фільтра подається корельований сигнал, а на його виході з'являється білий шум. Перевагою АР фільтра передбачення є багаторазове зважене віднімання попередніх відліків, що враховує форму СЦП вхідного сигналу. На рис. 4 представлено АЧХ фільтрів передбачення. Відомі пристрої черезперіодного віднімання мають жорстку форму АЧХ, яка далеко не завжди відповідає формі СЦП вхідної перешкоди.



а



б

Рисунок 4 – АЧХ фільтра передбачення для перешкод від літаків:
а - Boeing 707, б - Boeing 747

Розвитком АР фільтрів є решітчасті фільтри (РФ), робота яких описується системою рівнянь, що визначають вихідний сигнал у вигляді помилок прямого та зворотного передбачення:

$$a_t^p = a_t^{p-1} - K_p^p d_{t-1}^{p-1}, \quad d_t^p = d_{t-1}^{p-1} - K_p^p a_t^{p-1}. \quad (7)$$

Рівняння (7) визначають структуру РФ, яка зображена на рис. 5. При надходженні на вхід фільтра сигналу на виході кожної ланки з'являються помилки передбачення вперед і назад.

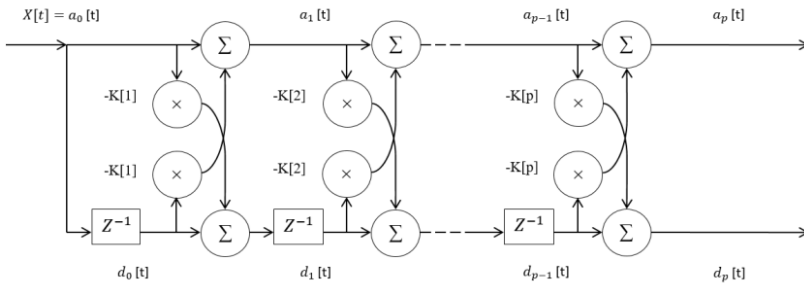


Рисунок 5 – Схема відбілюючого решітчастого фільтра р-го порядку

Дослідження, проведені в третьому розділі, показують, що в содарах пристрої придушення акустичних завад з використанням фільтрів лінійного передбачення можуть бути виконані у вигляді фільтрів прямої реалізації або решітчастих структур. До перших відносяться АР відбілюючі фільтри, а до других – відбілюючі РФ.

У **четвертому розділі** розглянуто методи адаптації содарів з фільтрами лінійного передбачення прямої реалізації і РФ.

Як відомо, САЗ функціонують в умовах, де швидко змінюється перешкодова обстановка. При зміні умов обробки, статистичних характеристик корисного сигналу або перешкоди, необхідно застосовувати адаптивні методи, а для роботи в реальному часі слід використовувати покрокове адаптивне придушення перешкод.

Коефіцієнти АР фільтра прямої реалізації, що змінюються у часі, обчислюються за допомогою деякого алгоритму адаптації. У даній роботі для поновлення параметрів АР фільтрів запропоновано застосовувати покроковий градієнтний алгоритм найменших квадратів і рекурсивний метод найменших квадратів (РМНК).

У методі найменших квадратів коефіцієнти фільтра обчислюються за допомогою виразу

$$\Phi_{t+1}[j] = \Phi_t[j] - \mu a[t] x[t],$$

де μ – позитивний коефіцієнт, названий розміром кроку. Використовуючи оновлені помилки передбачення, градієнтним методом обчислюють оновлені коефіцієнти відбиття

$$K_{t+1}^k = K_t^k + \mu_k a_t^k d_{t-1}^k. \quad (8)$$

Покроковий алгоритм адаптації для АР фільтрів і РФ, що базується на РМНК, більш складний і вимагає більшого числа обчислень. Однак в содарах він швидше адаптується, в порівнянні з градієнтним методом. В РМНК алгоритмі рекурсивно відновлюється оцінка зворотної кореляційної матриці перешкод.

У пристроях придушення шумів для вилучення інформації може бути використаний основний канал з сумішню інформаційного сигналу і перешкоди (шуму), а також опорний або перешкодовий канал. Коли один процес $Y(t)$ необхідно оцінити за даними спостереження за пов'язаним з ним процесом $X(t)$, то доцільно об'єднати ці процеси в один процес і його обробку реалізувати за допомогою РФ для випадку пов'язаних процесів. Точне рішення по методу найменших квадратів в цьому випадку представляє собою узагальнення рішення, наведеного вище (8). Отримані вирази описують РФ з перешкодовим каналом. На рис. 6 показана схема такого РФ, де $Y(t)$ – вхідний сигнал інформаційного, а $X(t)$ – сигнал перешкодового каналів.

На рис. 7 наведені параметричні АР оцінки спектрів перешкод в місті, які мали місце при використанні адаптивного РФ з перешкодовим каналом.

Адаптивне формування спектру перешкод в РФ дозволяє також виконувати аналіз розподілу їх інтенсивності в смузі частот функціонування САЗ і адаптивно виконувати вибір для зондування частоти з найменшим значенням інтенсивності завад.

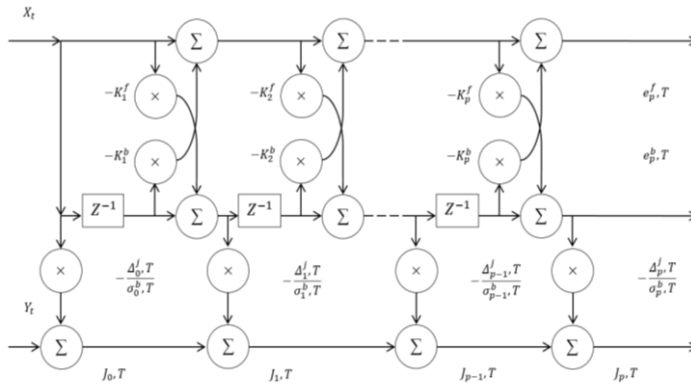


Рисунок 6 – Схема адаптивного РФ з перешкодовим каналом

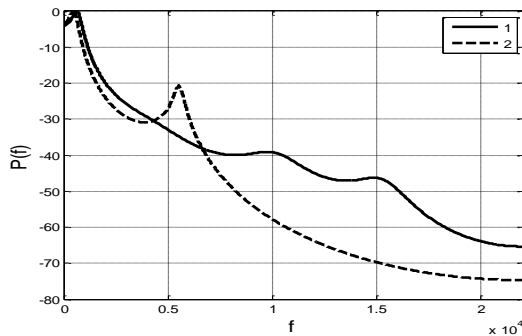


Рисунок 7 – Параметричні АР оцінки спектрів перешкод при використанні адаптивного РФ: 1 – засніжена дорога АР (8), 2 – міська дорога АР (4)

У п'ятому розділі виконано аналіз роботи адаптивних пристроїв придушення завад содарів.

В системах акустичного зондування інформативним параметром є доплеровська частота, що несе інформацію про швидкість вітру. Похибка її оцінки залежить від параметрів шуму, перешкод, виду і параметрів зонduючого сигналу. На практиці вплив активних і пасивних акустичних перешкод може призводити до істотних погрешностей в оцінці доплеровської частоти. У зв'язку з цим в роботі виконано дослідження методом статистичного моделювання впливу шумів і перешкод на точність оцінок центральної частоти корисних сигналів, розсіяних неоднорідностями

атмосфери. Відношення сигнал/перешкода визначалося як $Q_1 = \sigma_c^2 / \sigma_n^2$, де σ_c^2 – дисперсія сигналу, σ_n^2 – дисперсія перешкоди.

Ефективність роботи пристроїв придушення перешкод в значній мірі залежить від величини корельованості перешкод в основному і перешкодовому каналах. Вплив різних факторів на кореляцію перешкод в каналах моделювалося рівнем шуму в перешкодовому каналі, при цьому відношення перешкода/шум в перешкодовому каналі визначалося як $Q_2 = \sigma_n^2 / \sigma_{ш}^2$, де σ_n^2 – дисперсія перешкоди, $\sigma_{ш}^2$ – дисперсія шуму.

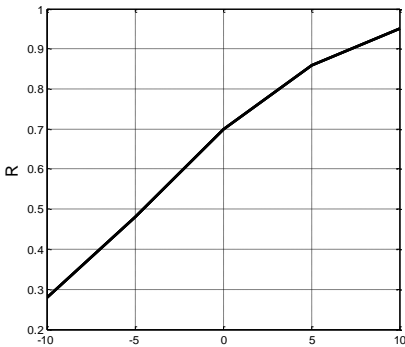


Рисунок 8 – Вплив відношення перешкода/білий шум в перешкодовому каналі на величину взаємної кореляції процесів в інформаційному і перешкодовому каналах

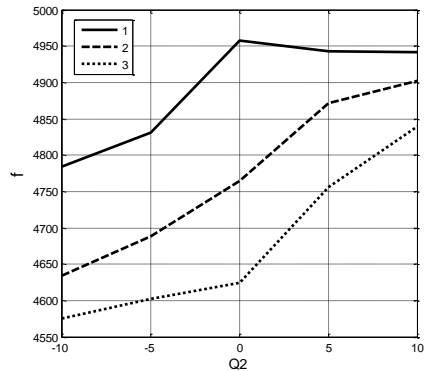


Рисунок 9 – Оцінки частоти корисного сигналу при впливі шуму в перешкодовому каналі (частоти піків СЦП сигналу 5000 Гц, перешкоди – 4000 Гц): 1 – відношення сигнал-перешкода $Q_1=10$ дБ, 2 – відношення сигнал-перешкода $Q_1=0$ дБ, 3 – відношення сигнал-перешкода $Q_1=-5$ дБ

Залежність, представлена на рис. 8, демонструє вплив відношення перешкода/білий шум (Q_2) в перешкодовому каналі (в децибелах) на величину взаємної кореляції перешкод в інформаційному і перешкодовому каналах. Як показали результати експериментів, зниження рівня кореляції перешкод в обох каналах призводить до зростання помилок при оцінюванні частоти піку сигналу, а зростання кореляції – відповідно до зниження помилок оцінки частоти. Якщо не брати до уваги відмінність корельованої

акустичної перешкоди в основному і перешкодовому каналах, то це може привести до завищення точності оцінювання доплеровської частоти при моделюванні.

Як видно з графіків рис. 9, з ростом рівня білого шуму в перешкодовому каналі точність оцінки середньої частоти сигналу знижується. Для генерації сигналу та отримання оцінки частоти використовувалася вибірка довжиною 100 відліків. Частота перешкоди у всіх експериментах становила 4000 Гц, а її ширина смуги 300 Гц. Частота корисного сигналу дорівнювала 5000 Гц, а ширина смуги корисного сигналу становила 200 Гц.

Аналіз впливу корельованої перешкоди на оцінку частоти розсіяного акустичного сигналу показав, що оцінка залежить від багатьох факторів: потужності перешкоди, рівня шуму в перешкодовому каналі, частот піків перешкоди, ширини смуги перешкоди, числа усереднень результатів вимірювань, характеристик зондуючого і відбитого сигналів. Різні комбінації цих факторів в різних умовах по-різному впливають на точність оцінювання доплеровської частоти. В дисертаційній роботі показано, що вдосконалені адаптивні методи придушення акустичних перешкод, дозволяють врахувати і в значній мірі компенсувати вплив нестаціонарності перешкод і складного характеру статистичних характеристик корисного сигналу, на результати вимірювань.

У напівнатурних експериментах досліджувалися можливості зниження рівня перешкод від різних джерел реальних акустичних перешкод: чотирьох типів авіалайнерів Боїнг, дощу, швидкого поїзда, шуму автотранспорту, що рухається по засніженій дорозі та міській автотрасі.

Аналіз отриманих результатів показує, що при використанні в САЗ пристроїв придушення перешкод на основі РФ з перешкодовим каналом, похибки оцінювання частоти відбитого сигналу помітно зменшуються, а, отже, зростає точність визначення оцінюваних характеристик атмосфери.

Показано, що спільна обробка даних зондування, одержуваних в комплексній системі акустичний - радіоакустичний локатор, дозволяє істотно зменшити вплив невизначеності атмосферних параметрів, насамперед вологості повітря, на інтерпретацію результатів зондування і зменшити похибки оцінювання швидкості вітру и температури середовища.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача удосконалення методів адаптивного придушення акустичних перешкод

фільтрами лінійного передбачення в системах дистанційного акустичного зондування атмосфери, що забезпечують ефективне функціонування систем в умовах швидкоплинної перешкодової обстановки. При цьому отримані такі основні результати.

1. Проведений аналіз літературних джерел показав, що існуючі методи захисту САЗ від перешкод не є ефективними, а сучасні методи адаптивної просторово-часової обробки сигналів практично не використовуються в системах акустичного зондування атмосфери. Відповідно до цього вдосконалення відомих методів з метою їх використання в пристроях адаптивної обробки акустичних сигналів содарів, з урахуванням специфіки акустичних перешкод і умов функціонування систем зондування, є актуальною науково-прикладною задачею.

2. В роботі запропоновані комплексні математичні моделі лінійного передбачення акустичних сигналів і перешкод, що дозволяють удосконалити обробку акустичних сигналів в САЗ. Показано, що квадратурна обробка вузькосмугових випадкових сигналів може бути описана і реалізована на основі комплексної моделі АР. Запропоновано відповідні рівняння АР, спосіб розрахунку коефіцієнтів моделі авторегресії. Побудована модель АР першого порядку комплексної обвідної вузькосмугового сигналу.

3. Вперше запропоновано метод генерації комплексного випадкового процесу АР за заданими спектральними характеристиками. Знайдені співвідношення, що зв'язують комплексні коефіцієнти АР і коріння характеристичного рівняння, які в свою чергу виражаються через спектральні характеристики корельованого випадкового процесу. Параметри моделі АР розраховуються по частотах спектральних піків параметричних спектрів і їх ширини смуги. На основі цієї моделі розроблені методи генерації дійсних і комплексних випадкових процесів із заданими спектральними характеристиками.

4. Запропоновані математичні моделі розсіяних акустичних сигналів і каналів розсіювання дозволяють створювати з їх використанням апаратно-програмні пристрої – імітаторі розсіяних сигналів чи інформаційних локаційних каналів систем акустичного зондування, які вкрай необхідні при випробуваннях наявної або проекрованої апаратури. З використанням імітаторів може визначатися працездатність апаратури, реальні значення показників якості відокремлених блоків і здійснюватися метрологічна атестація станцій в цілому.

5. Результати досліджень щодо захисту від акустичних перешкод в содарах показали переваги решітчастої структури перед фільтрами прямої реалізації, які найбільш очевидні в разі адаптивної фільтрації. Покроковий

алгоритм адаптації АР і РФ фільтрів, заснований на рекурсивному методі найменших квадратів, більш складний, вимагає більшого числа обчислень, однак він забезпечує менший час адаптації в порівнянні з градієнтними методами.

6. Запропонована спільна обробка даних зондування, одержуваних в комплексній системі акустичний-радіоакустичний локатор, яка дозволяє істотно зменшити вплив невизначеності атмосферних параметрів, насамперед вологості повітря, на інтерпретацію результатів зондування і зменшити похибки оцінювання швидкості вітру и температури середовища.

7. У напівнатурних експериментах досліджено ефективність удосконалених адаптивних методів з придушення реальних акустичних перешкод: від різних типів авіалайнерів Боїнг; швидкого поїзда; шуму дощу; перешкод, створюваних автотранспортом, що рухається по засніженій дорозі і міський автотрасі. Показано, що частоту зондуючого сигналу необхідно вибирати в діапазоні, де рівень потужності акустичних перешкод незначний; істотний вплив на точність оцінювання доплеровської частоти надає ступінь взаємної кореляції перешкод в інформаційному і перешкодовому каналах. Аналіз отриманих результатів показує, що при використанні в САЗ пристроїв придушення перешкод на основі РФ з перешкодовим каналом виграш у співвідношенні сигнал/завада складає 30 – 40 дБ, похибки оцінювання частоти відбитого сигналу помітно зменшуються, а, отже, зростає точність визначення оцінюваних характеристик атмосфери.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V., Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering.- New York. - 2016.- Vol. 75, №20.- P.1885-1892. **(SCOPUS)**.

2. Kartashov V. M., Tikhonov V. A. , Voronin V. V. Features of construction and application of complex systems for the atmosphere remote sounding// Telecommunications and Radio Engineering.- New York. - 2017.- Vol. 76, №8.- P.743-749. **(SCOPUS)**.

3. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Кошевой В.В. Подавление акустических помех в системах дистанционного мониторинга атмосферы с использованием решетчатых фильтров// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2019. - №2 (135) - С. 40-48.

4. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Селезнев И.С. Авторегрессионные фильтры подавления помех в системах акустического

зондирования атмосферы// Радиотехніка (Харків). - 2019. - Вип. 196. - С. 106-111.

5. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В. Адаптивное подавление помех в системах акустического зондирования атмосферы в аэропортах// Прикладна радіоелектроніка (Харків). - 2019. - Т. 18. №1,2 - С. 16-22.

6. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Супрун А.С.А. Оценка частоты сигнала при адаптивном подавлении помех в системах акустического зондирования атмосферы// Радиотехніка (Харків). - 2019. - Вип. 197. - С. 72-77.

7. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В. Моделирование полезных сигналов и помех систем зондирования атмосферы// Информационные системы и технологии: 5 Межд. науч.-техн. конф., 12-17 сентября 2016 г. Коблево-Харьков, 2016.- С. 107-108.

8. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В. Модели полезных сигналов и помех систем зондирования атмосферы// Проблемы розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: Тези доповідей наук.-техн. конф., 21-23 листопада 2016 р. Київ, 2016.-С.109.

9. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Толстых Е.Г. Комплексование систем дистанционного зондирования атмосферы// Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей VIII наук.-практ. конф., 21-23 вересня 2016 р. Запоріжжя, 2016.-С.47-48.

10. Босенко П.Н., Бургар О.Н., Воронин В.В. Совместное использование систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы//Матеріали 21 міжнародного молодіжного форуму NURE. т.3. Харків, 2017. - С. 49-50.

11. Максимук В.А. Воронин В.В. Авторегрессионные методы моделирования стационарных акустических сигналов //Матеріали 21 міжнародного молодіжного форуму NURE. т.3. Харків, 2017. - С. 53-54.

12. Воронин В.В., Лисовой Р.О. Характеристики сигналов систем зондирования атмосферы// Матеріали 23 міжнародного молодіжного форуму NURE. т.3. Харьков, 2019. - С. 60-61.

13. Воронин В.В., Кравченко М.М. Анализ погрешностей измерения характеристик атмосферы системами дистанционного зондирования //Матеріали 23 міжнародного молодіжного форуму NURE. т.3. Харків, 2019. - С. 70-71.

14. Воронин В.В., Чернов К.А. Адаптивное подавление помех в системах акустического зондирования //Матеріали 23 міжнародного молодіжного форуму NURE. т.3. Харків, 2019. - С. 56-57.

15. Воронин В.В., Ашихмин В.О. Адаптивное подавление помех в системах акустического зондирования атмосферы вблизи заснеженной дороги//Матеріали 23 міжнародного молодіжного форуму NURE. т.3. Харків, 2019. - С. 58-59.

АНОТАЦІЯ

Воронін В.В. Удосконалення методів захисту від перешкод систем акустичного зондування атмосфери. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2019.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення заводозахищеності систем акустичного зондування атмосфери шляхом використання адаптивних методів обробки для придушення активних і пасивних акустичних перешкод фільтрами лінійного передбачення.

Показано, що використання фільтрів лінійного передбачення дозволяє істотно вдосконалити системи акустичного зондування атмосфери, зробити їх більш компактними, мобільними. Синтезовано алгоритми формування комплексних випадкових сигналів із заданими спектральними характеристиками.

Розроблено ряд методів підвищення заводозахищеності систем акустичного зондування. Оцінку ефективності запропонованих методів виконано шляхом проведення півнатурних експериментів і математичного моделювання. Отримані результати свідчать про ефективність запропонованих адаптивних методів, використання яких дозволяє отримати вираш у відношенні сигнал/завада на рівні 30 – 40 дБ.

Ключові слова: системи акустичного зондування атмосфери, модель авторегресії, решітчастий фільтр, адаптивна обробка, сигнал, перешкода.

АННОТАЦИЯ

Воронин В.В. Усовершенствование методов защиты от помех систем акустического зондирования атмосферы. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи адаптивного подавления акустических помех фильтрами линейного предсказания для использования в прикладных задачах оценки доплеровской частоты в системах акустического зондирования атмосферы.

Показано, что использование фильтров линейного предсказания для подавления акустических помех позволяет существенно усовершенствовать системы акустического зондирования атмосферы, сделать их более компактными, мобильными. Конструктивные свойства моделей линейного предсказания случайных процессов, в частности коррелированных помех, позволяют сравнительно просто синтезировать фильтры подавления помех.

Для адаптивного обновления параметров фильтров прямой реализации и РФ предложено использовать МНК и РНК алгоритмы. Сравнение эффективности работы различных фильтров подавления помех производилось по точности оценивания доплеровской частоты.

Исследовано влияние коррелированной помехи на оценку частоты зондирующего сигнала в САЗ. Показано, что оценка зависит от многих факторов: мощности помехи, уровня шума в помеховом канале, частоты спектральных пиков помехи, ширины полосы частот помехи, числа усреднений результатов измерений. Совокупность этих факторов в разных условиях по-разному влияет на точность оценивания доплеровской частоты. Усовершенствованные адаптивные методы подавления акустических помех, позволяют учесть и в значительной степени компенсировать влияние нестационарности помех и сложного характера изменяющихся статистических характеристик полезного сигнала на результаты измерений.

Разработанные методы использовались для подавления помех от различных реальных источников: четырех типов авиалайнеров Боинг, дождя, шума автотранспорта движущегося по заснеженной дороге, городской автотрассы, скорого поезда. Влияние помех на точность оценивания доплеровской частоты заметно снижается, если повышать их взаимную корреляцию в информационном и помеховом каналах. Полученные результаты показывают, что использование адаптивных устройств подавления помех на РФ с помеховым каналом заметно повышает точность оценивания частоты отраженного сигнала и характеристик атмосферы.

Ключевые слова: системы акустического зондирования атмосферы, модель авторегрессии, решетчатый фильтр, адаптивная обработка, сигнал, помеха.

ABSTRACT

Voronin V.V. Improvement of methods for protection against interference with systems of acoustic sounding of the atmosphere. – Manuscript. Thesis for Candidate of Science Degree in Specialty 05.12.17 - Radio Engineering and Television Systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2019.

The thesis is aimed at solving actual scientific and technical problem of increasing the noise immunity of the systems of acoustic sounding of the atmosphere by the use of adaptive processing methods for the suppression of active and passive acoustic interferences by linear prediction filters.

It is shown that the use of linear prediction filters make it possible to improve significantly the systems of acoustic sounding of the atmosphere, make them more compact, mobile. The algorithms for forming complex random signals with given spectral characteristics have been synthesized.

A number of methods for increasing the noise immunity of acoustic sounding systems have been developed. The evaluation of the effectiveness of the proposed methods was performed by conducting semi-natural experiments and mathematical modeling. The obtained results evidence the effectiveness of the proposed adaptive methods, the use of which makes it possible to obtain a gain in signal-to-noise ratio at the level of 30 - 40 dB.

Key words: systems of acoustic sounding of the atmosphere, autoregression model, lattice filter, adaptive processing, signal, interference.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 507-19.
Підписано до друку 31.10.2019. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ ®
ИЗДАТ 
ТИПОГРАФІЯ
www.stil-izdat.com