

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**Куля Дмитро Миколайович**

УДК 621.396.96: 551.51: 621.391.8

**УДОСКОНАЛЕННЯ СЛІДКУВАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ  
СИГНАЛІВ СИСТЕМ РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ  
АТМОСФЕРИ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

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 радіоелектронних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Печенін Валерій Васильович**,  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»,  
професор кафедри проектування радіоелектронних  
систем літальних апаратів,  
доктор фізико-математичних наук, професор;  
**Ситнік Олег Вікторович**,  
Інститут радіофізики і  
електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу  
радіофізичної інтроскопії

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 року о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Знання про стан атмосфери дозволяють в теперішній час планувати та корегувати багато аспектів людської життєдіяльності, тому завдання визначення параметрів атмосфери є одним з найважливіших в житті людини. Оперативне визначення стану атмосфери є неможливим без використання різноманітних дистанційних засобів вимірювання метеопараметрів: радіолокаційного, акустичного, лазерного, радіоакустичного.

Метод радіоакустичного зондування атмосфери (РАЗ), суть якого полягає в радіолокації звукової хвилі, дозволяє досить точно та оперативно оцінювати параметри атмосферного пограничного шару (АПШ), висота якого залежить від конкретних умов і може приймати значення від 100 м до 2 км, накопичувати експериментальні данні про стан атмосфери з метою аналізу та прогнозування його поведінки, контролювати стан атмосфери з метою вчасного попередження тяжких наслідків технологічної життєдіяльності людини, вести метеоспостереження зліту та посадки літаків, досліджувати принципи взаємодії акустичного та електромагнітного коливань в атмосфері.

Проте ефективність застосування систем РАЗ значною мірою обмежується можливостями існуючих технічних засобів, в той час як зростаючі потреби практики вимагають істотного поліпшення основних характеристик станцій. Потрібно покращувати основні показники якості систем зондування: точність вимірювань, дальність дії, завадостійкість, оперативність отримання оцінок.

Сучасні системи РАЗ розділяються на два основних типи – системи з підстроюванням частоти зондуючих сигналів і системи без підстроювання частоти зондуючих сигналів. Системи з підстроюванням частоти характеризуються задовільною точністю вимірювання температури повітря (0.5К), але оперативність отримання висотних профілів вимірюваних параметрів часто виявляється недостатньою при вирішенні актуальних завдань метеорології і дослідження властивостей процесів, що протікають в атмосфері Землі. Тому є практичний інтерес спрямований на розробку систем РАЗ без підстроювання частоти, які характеризуються набагато більшою оперативністю отримання профілів температури повітря. Однак застосовані при цьому алгоритми вимірювання засновані на методах оцінки доплерівської частоти не адекватні процесам, що відбуваються в радіоакустичному локаційному каналі, в наслідок чого результати вимірювань характеризуються систематичною похибкою 1-2 градуси.

Зважаючи на це, є актуальною тема дисертаційних досліджень, направлених на вдосконалення систем РАЗ атмосфери, слідкувальних методів обробки розсіяних коливань, методів оптимальної лінійної фільтрації оцінок параметрів атмосфери, методик визначення потенційної точності отримуваних результатів за умови використання різноманітних зондуючих сигналів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження пов'язані з виконанням планової держбюджетної НДР № 260 “Дослідження потенційних можливостей ефективного функціонування мережевих реконфігурованих інформаційно-вимірювальних систем екологічного моніторингу” (державна реєстрація № 0111U002903, 2011 – 2013 рр.), у якій пошукач був співвиконавцем.

**Мета й завдання дослідження.** Метою досліджень є вдосконалення слідкувальних методів обробки сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери, що враховують перетворення, яким піддається радіосигнал при поширенні в локаційному радіоакустичному каналі, виконують оптимальну лінійну фільтрацію отримуваних оцінок параметрів атмосфери та забезпечують підвищення точності та оперативності вимірювання параметрів атмосфери.

Для досягнення поставлених цілей в роботі вирішені наступні задачі:

- виконано аналіз діючих радіоакустичних систем та алгоритмів обробки прийнятих коливань, які в них застосовуються;
- розроблений слідкувальний метод обробки прийнятих сигналів;
- виконана оцінка потенційної якості результатів вимірювання параметрів сигналів, які отримуються за допомогою запропонованого слідкувального методу обробки;
- синтезовано структуру та обрано параметри оптимального лінійного фільтра, що входить до складу слідкувального пристрою обробки сигналів.

**Об'єкт дослідження** – процес зондування атмосфери акустичними та електромагнітними хвилями.

**Предмет дослідження** – слідкувальний метод оброблення розсіяних сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери.

**Методи дослідження:** методи математичного аналізу, теорії ймовірностей, математичної статистики та випадкових процесів, теорії поширення хвиль в турбулентній атмосфері, методи синтезу та аналізу радіосистем, методи оптимізації та прийняття рішень, комп'ютерне моделювання, фізичний експеримент.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше розроблено слідкувальний метод обробки розсіяних радіосигналів систем РАЗ атмосфери, який враховує перетворення, яким піддається радіосигнал при поширенні в локаційному радіоакустичному каналі. Розроблений метод дозволяє усунути систематичні похибки, що наявні в результатах вимірювань метеопараметрів існуючими системами РАЗ, а також підвищити якість та оперативність отримання оцінок інформаційних параметрів.

2. Вперше виконано аналіз і вибір моделей оптимальної лінійної фільтрації в системах РАЗ атмосфери. Показано, що в якості моделі мінливого параметра оптимального лінійного фільтра системи РАЗ доцільно використовувати стохастичну модель з незалежними першими приростами. Використання

вказаного лінійного фільтра дозволяє підвищити якість та оперативність отримання оцінок інформаційних параметрів.

3. Удосконалено метод, який дозволяє оцінити потенційну точність результатів вимірювань, отримуваних за допомогою розробленого слідкувального методу. Метод дозволяє проводити аналіз потенційної точності вимірювання метеопараметрів при використанні різних видів зондуючих сигналів. Відмінність методу полягає у формуванні та аналізі тіла сигнальної функції радіоакустичних сигналів. Побудовано та виконано аналіз тіл сигнальної функції простих зондуючих сигналів систем РАЗ. Тіла дозволяють проводити аналіз потенційної точності вимірювання параметрів атмосфери слідкувальним методом при використанні різних зондуючих сигналів.

4. Вперше визначена потенційна точність вимірювання метеопараметрів системами РАЗ при використанні слідкувального методу обробки сигналів та простих зондуючих сигналів з прямокутними та гаусівськими огинаючими. Результати аналізу підтверджують те, що використання слідкувального методу обробки сигналів підвищує потенційну точність оцінок метеопараметрів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані в роботі результати дозволяють підвищити точність та оперативність вимірювань параметрів атмосфери існуючими системами РАЗ.

Запропонований слідкувальний метод обробки розсіяних сигналів та обрана модель оптимального лінійного фільтра дозволяють усунути наявні систематичні похибки вимірювання метеопараметрів, а використання запропонованого способу оцінки потенційної точності вимірювання параметрів атмосфери дозволяє визначати доцільність використання тих чи інших зондуючих коливань без проведення фізичних експериментів.

Практичне значення та наукова новизна отриманих в дисертації результатів підтверджуються патентами на винаходи: № 97612 “Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури”; № 105052 “Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури”; № а2013 04840 від 6.05.15 (рішення про видачу патенту) “Пристрій для дистанційної реєстрації вертикального профілю температури атмосферного повітря”.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені в ХНУРЕ при виконанні держбюджетної НДР та в навчальному процесі кафедри "Радіоелектронні системи" ХНУРЕ під час виконання дипломних і магістерських дослідницьких робіт, про що свідчать Акти впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, що відображають сутність дисертаційної роботи і містяться в пунктах наукової новизни та практичного значення, отримані автором особисто і досить повно викладені у 27 наукових працях, опублікованих здобувачем самостійно та у співавторстві.

Основні наукові результати дисертації отримано автором самостійно. У статтях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача такий:

В роботах [1, 2, 6, 11, 12, 13, 15, 21] розглянуто існуючі методи обробки сигналів, які використовуються в радіо акустичних системах, вказано основні причини виникнення систематичної похибки вимірювання параметрів атмосфери при використанні таких алгоритмів. Запропоновано слідкувальний алгоритм обробки сигналів систем РАЗ атмосфери, при використанні якого в системах РАЗ стає можливим оцінювати параметри атмосфери без систематичної помилки.

В [3, 10] виконано оцінку похибки реєстрації вологості атмосфери системами РАЗ, в яких оцінка вологості є результат кореляційної обробки відбитого від акустичного пакета радіосигналу.

В [4, 9, 16, 20, 22] розглянуто можливість застосування методів оптимальної лінійної фільтрації в системах РАЗ атмосфери з урахуванням особливостей поширення звуку в атмосфері. Виведено головне рівняння лінійної фільтрації оцінок швидкості звуку в системах РАЗ. Виконано огляд моделей зміни інформаційних параметрів та показано, яка модель є найбільш адекватною моделлю процесу поширення звуку в атмосфері.

В [5, 14] визначені співвідношення для розрахунку потенційної точності вимірювання параметрів атмосфери кореляційним методом. Розрахована потенційна точність вимірювання параметрів атмосфери в залежності від виду зондуючих сигналів. Визначено вплив енергетичного характеру параметра розстроювання умови Брегга на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери кореляційним методом.

В [7, 8, 19, 24] підготовлено частину основних результатів та висновки.

В [17, 18, 23] Визначено недоліки, через які результати вимірювань, одержувані з використанням існуючих алгоритмів обробки сигналів систем РАЗ, супроводжуються значними за величиною систематичними похибками, та вказано шляхи їх вирішення.

**Апробація.** Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені, доповідалися й обговорювались на міжнародних конференціях і форумах, а саме на: 16-му (США, 2012 р.) Міжнародному симпозиумі з дистанційних методів зондування атмосфери, на 22-й та 23-й Міжнародних Кримських конференціях «Свч-техніка й телекомунікаційні технології» КримМіКо (м. Севастополь, 2012 р., 2013 р.), на 7-й «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ – 2011» та 8-й «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ – 2012» міжнародних молодіжних НТК (Севастополь), на 4-му міжнародному радіоелектронному форумі "Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку" (МРФ – 2011), на Міжнародній Школі молодих вчених «Фізика навколишнього середовища» ім. А.Г. Колесніка (Томськ 2012, 2013), на 15-му, 16-му, 17-му Міжнародних молодіжних

радіоелектронних форумах "Радіоелектроніка й молодь" (м. Харків, 2011 р., 2012 р., 2013 р.).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 27 наукових працях. Серед них 7 – статті, опубліковані у фахових наукових виданнях, які включені до переліку ВАК України, 4 – статті, опубліковані в зарубіжних журналах, 12 – матеріали міжнародних форумів і конференцій, 1 монографія, 3 патентів на винаходи, статті [9, 10, 11] та тези [21, 22] викладені в науковій базі Scopus.

**Структура та об'єм дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів та висновків. Повний об'єм дисертації складає 151 сторінки, має 77 ілюстрацій, список використаних посилань містить 112 найменувань на 13-ти сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність та виконано загальний огляд задачі дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформовано мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Показано особистий внесок здобувача у вигляді кількості публікацій та апробації результатів дисертаційних досліджень.

**В першому розділі** здійснено огляд існуючих радіоакустичних систем дистанційного зондування, розглянуті їх основні характеристики, історія розвитку та сфери використання. Показано, що системи РАЗ атмосфери виготовляються та широко використовуються у світі.

Радіоакустичне зондування атмосфери засноване на радіолокації звукової хвилі, що розповсюджується в атмосфері. Отримання відбитого сигналу можливо в силу неповного відбиття радіохвилі від неоднорідностей діелектричної проникності, які виникають в результаті модуляції акустичними коливаннями щільності повітря в атмосфері.

Використовувані в даний час в системах РАЗ методи обробки сигналів являють собою евристичні пошукові методи оцінювання енергетичного параметра сигналу, які умовно можна розділити на методи з підстроюванням і без підстроювання частот зондуючих коливань. Методи з підстроюванням частот зондуючих сигналів вимагають великої кількості часу для зондування, а результати вимірювань, одержувані з використанням існуючих алгоритмів без підстроювання частоти зондуючих сигналів, супроводжуються значними за величиною систематичними похибками: одержувана температура атмосфери відрізняється від істинної на 1-2 градуси.

Потрібно покращувати основні показники якості систем радіоакустичного зондування: точність вимірювань і оперативність отримання оцінок.

**В другому розділі** синтезований та проаналізований оптимальний алгоритм обробки сигналів систем РАЗ атмосфери, що оцінює енергетичний параметр  $q$

розстроювання умови Брега, та використовує функцію розсіяння в якості моделі радіоакустичного локаційного каналу. Проведено дослідження властивостей зондуючих сигналів систем РАЗ і показано вплив виду зондуючих сигналів на якість оцінок параметрів атмосфери, одержуваних системами РАЗ.

В системах РАЗ розсіяння електромагнітного сигналу на акустичній хвильовій посилює частотозалежним, визначається і описується спільною функцією розсіяння використовуваних звукового та радіосигналу (1). В якості інформативного параметра прийнятих сигналів доцільно використовувати величину  $q = 2k_e - k_s$  ( $k_e, k_s$  – хвильові числа радіохвилі та звукової хвилі відповідно), що характеризує ступінь розстроювання умови Брега та однозначно функціонально пов'язана зі швидкістю звуку.

Задача оцінювання швидкості звуку відповідно до синтезованого алгоритма зводиться до оцінювання параметра  $q$ , який виступає як енергетичний параметр, що характеризує обидва складові векторного зондуючого коливання і стан середовища.

Структурна схема алгоритму обробки розсіяного сигналу  $S(t, q_m)$  для формування оцінок максимальної правдоподібності інформативного параметра в системах РАЗ показана на рис. 1.

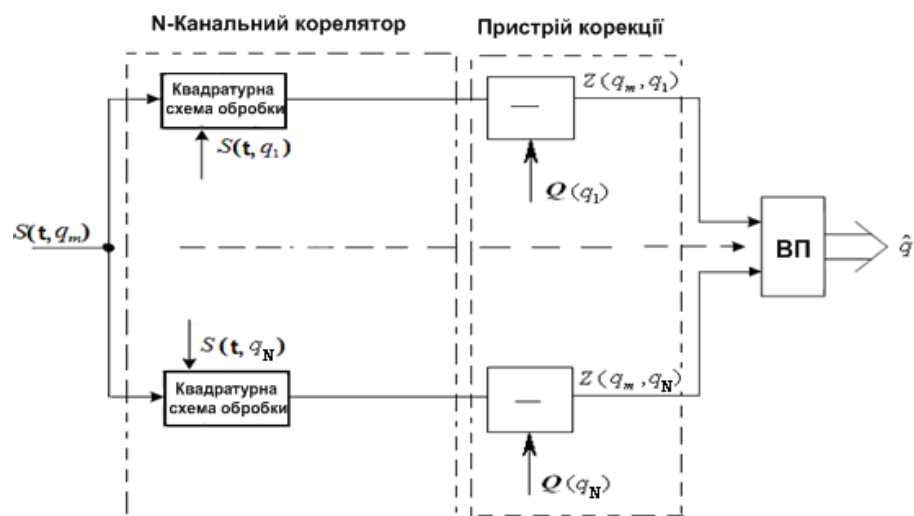


Рис. 1 Схема формування оцінок максимальної правдоподібності інформативного параметра в системах РАЗ

Схема містить  $N$ -канальний корелятор. В якості опорних сигналів кореляторів використовуються коливання  $S(t, q_N)$ , сформовані з використанням функції розсіяння  $F(r, q)$  (1), що приведені до часових з урахуванням того, що  $t = r/c$  (де  $r$  – просторова координата,  $c$  – швидкість світла)

$$F(r, q) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r) S^*(r') e^{jq'r'} dr', \quad (1)$$



де  $k_s = 2\pi f_s / c_s$  – хвильове число для звуку;  $k_e = 2\pi f / c$  – хвильове число електромагнітної хвилі;  $r$  – зсув сигналів по координаті «дальність»;  $E(2r'-r)$  – комплексна просторова обвідна радіосигналу;  $S(r')$  – комплексна просторова обвідна акустичного сигналу.

Вихідний сигнал каналу схеми описується виразом

$$Z(q_m, q_i) = |S(q_m, q_i)| - \frac{1}{2}Q(q_i), \quad i = 1, N,$$

де  $S(q_m, q_i) = \int_0^T S(t, q_m) \cdot S(t, q_i) dt$  – функція взаємної кореляції вхідного корисного і опорного сигналів;  $Q(q_i) = \int_0^T S^2(t, q_i) dt$  – енергія опорного сигналу, у відповідності зі значеннями якої здійснюється корекція вихідного сигналу каналу корелятора.

Вирішальний пристрій (ВП) визначає канал з найбільшим вихідним значенням, на підставі чого приймається рішення про значення параметра  $q$  прийнятого сигналу. Далі визначається швидкість звуку в точці розсіяння та температура середовища.

Потенційні можливості отримання інформації системами радіоакустичного зондування атмосфери залежать від властивостей сукупності зондуючих сигналів - акустичного та електромагнітного коливань радіоакустичного векторного сигналу.

Аналіз і дослідження властивостей зондуючих сигналів здійснюється з використанням функції розсіяння (1) і її модуля. Графічне зображення модуля функції розсіяння  $|F(r, q)|$  є тіло розсіяння.

Показано, що просторова роздільна здатність систем визначається протяжністю тіла розсіяння уздовж осі  $r$  і залежить, в основному, від тривалості акустичного імпульсу. Протяжність тіла уздовж осі  $q$  визначає діапазон  $\Delta q$ , при якому можливе отримання відбитого сигналу, він також залежить від тривалості акустичного імпульсу  $\tau$  (чим  $\tau$  менше, тим  $\Delta q$  більше).

**У третьому розділі** синтезований слідкувальний метод обробки сигналів систем РАЗ. Проведено аналіз роботи дискримінатора при використанні різних видів зондуючих сигналів.

Функціонування слідкувального алгоритму обробки сигналів систем РАЗ описується виразами (3) і (4)

$$\left( \int_0^T S(t, q_0) S(t, q_1) dt \right) - Q(q_1) - \left( \int_0^T S(t, q_0) S(t, q_2) dt \right) - Q(q_2) = 0, \quad (3)$$

$$\left( \int_0^T S(t, q) S(t, q_1) dt \right) - Q(q_1) - \left( \int_0^T S(t, q) S(t, q_2) dt \right) - Q(q_2) = U, \quad (4)$$

де  $S(t, q_1)$ ,  $S(t, q_2)$  – опорні сигнали, сформовані з використанням функції розсіяння;  $S(t, q_0)$ ,  $S(t, q)$  – сигнали розсіяні на сусідніх рівнях вимірювань в атмосфері;  $U$  – напруга, що визначає ступінь відмінності між значеннями  $q_0$  і  $q$ ;  $Q(q_1)$ ,  $Q(q_2)$  – коригувальні складові, відповідні енергетичним рівням опорних сигналів.

Структурна схема відповідного слідкувального пристрою обробки радіосигналу показано на рис. 3.

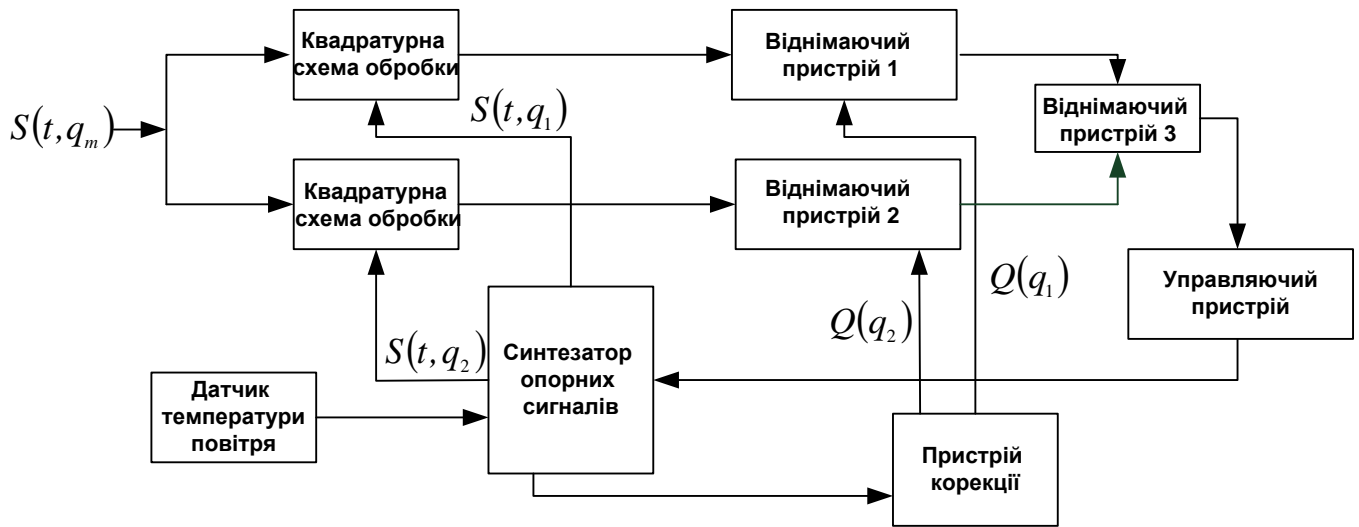


Рис. 3 Слідкувальний пристрій обробки сигналів систем РАЗ атмосфери

Схема складається з датчика температури, дискримінатора, управляючого пристрою, синтезатора опорних сигналів і пристрою корекції. Датчик температури вимірює температуру на першому нижньому рівні траси зондування, відповідно до якої формується управляючий сигнал для синтезатора опорних сигналів. Значення параметрів  $q_1$  і  $q_2$  розстроювання умови Брегга, відповідно до яких необхідно формувати опорні сигнали для другого рівня траси зондування, обираються такими, щоб різниця між кореляційними інтегралами (вираз (3)) дорівнювала нулю.

Опорні сигнали надходять на пристрій корекції для формування значень  $Q(q_1)$  і  $Q(q_2)$ , а потім на дискримінатор, що складається з двоканального корелятора і 3-х віднімаючих пристроїв. На виході дискримінатора формується різниця  $U$  між вихідними сигналами кореляційних каналів з різними опорними сигналами. Дискримінаційна характеристика (рис. 4) показує залежність напруги на виході дискримінатора від різниці  $y = q - q_0$ , де  $q$  – розстроювання умови Брегга на деякому рівні траси зондування,  $q_0$  – розстроювання умови Брегга на попередньому рівні траси зондування.

Протяжність лінійної ділянки дискримінаційної характеристики для заданих видів зондуючих коливань залежить від  $2\Delta$  – величини, на яку відрізняються значення  $q_1$  і  $q_2$  опорних сигналів, де  $q_1 = q_0 - \Delta$ ,  $q_2 = q_0 + \Delta$ .

Управляючий пристрій обчислює значення параметра розстроювання умови Брегга на поточному рівні траси зондування і формує управляючий сигнал, що задає для генератора опорних сигналів значення параметра розстроювання умови Брегга, при яких напруга на виході дискримінатора для сигналу з поточного рівня траси зондування буде наближатися до нуля.

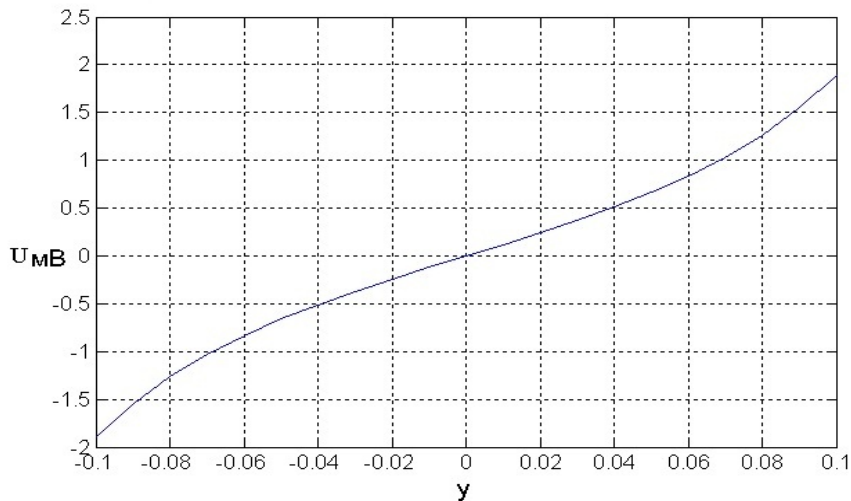


Рис. 4 Вид дискримінаційної характеристики  $U(y)$  у разі використання простих зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими

Особливістю оцінки швидкості звуку в радіоакустичних системах за значенням енергетичного параметра розстроювання умови Брегга  $q$  є те, що логарифм функціоналу відношення правдоподібності (5) має різну форму і ширину головного пелюстка залежно від значення параметра розстроювання умови Брегга  $q_0$ , при якому формується розсіяний на акустичній посилючі радіосигнал,

$$M(q_0, q) = \left| \int_0^T S(t, q_0) S(t, q) dt \right| - Q(q), \quad (5)$$

де  $S(t, q_0)$  – розсіяний на акустичній посилючі радіосигнал,  $S(t, q)$  – опорний сигнал, сформований з використанням функції розсіяння,  $Q(q)$  – енергія опорного сигналу. В результаті форма дискримінаційної характеристики радіоакустичної слідкувальної системи залежить від значень  $q_1$  і  $q_2$  параметрів опорних сигналів дискримінаційного пристрою (рис. 3) і являє собою деяке тіло.

На рис. 5 показано тіло дискримінаційної характеристики радіоакустичної слідкувальної системи, за умови використання простих зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими.

При використанні різних видів зондуючих сигналів дискримінаційний пристрій характеризується різними дискримінаційними характеристиками, які відрізняються як довжиною лінійних ділянок перерізів дискримінаційної характеристики, так і їх крутизною. За умови використання простих зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими діапазон зміни оцінюваного параметра, в межах якого алгоритм буде працездатний, становить  $[-0.1, 0.1]$ , що відповідає діапазону зміни температури  $40^{\circ}\text{C}$ .

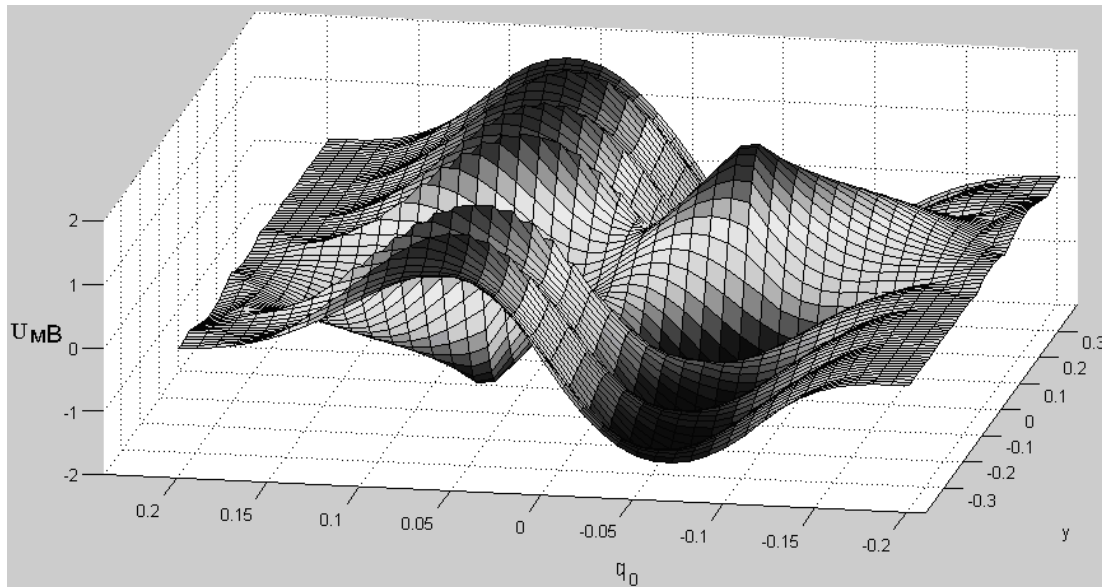


Рис. 5 Тіло дискримінаційної характеристики при використанні зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими ( $\Delta = 0.05$ )

В четвертому розділі проведено аналіз і вибір моделей мінливого інформаційного параметра для використання в алгоритмах оптимальної лінійної фільтрації стосовно до систем РАЗ. Вивчено параметрична і структурна чутливість оптимального лінійного фільтра системи РАЗ атмосфери.

Суть оптимальної лінійної фільтрації інформаційного процесу систем РАЗ полягає в послідовному згладжуванні оцінок вектора стану на поточному кроці вимірювання з використанням прогнозованої на поточний крок оцінки, де правило прогнозування визначається обраною моделлю зміни оцінюваного параметра.

В системах РАЗ атмосфери інформаційний процес, який необхідно оцінити – це процес зміни швидкості звуку залежно від висоти. Отже, для систем РАЗ рівнянням спостереження є рівняння виду  $\theta_s = H C_s + n$ , де  $C_s = \|c_s \ c'_s \ c''_s \ c'''_s \dots \ c_s^n\|^T$  – швидкість звуку і її похідні;  $\theta_s = q$  – вектор спостереження ( $q$  – параметр розстроювання умови Брегга);  $H$  – матриця перерахунку, яка визначається виходячи з виразу  $H C_s = \theta_s$ ;  $n$  – похибка вимірювання параметра  $\theta_s$ .

Вирази для результуючої оцінки вектора стану  $C_{s(\kappa+1)}$  у разі непрямого виміру, тобто коли параметри, що входять у вектор стану, обчислюються за деякою

формулою, в яку входить вектор спостережуваних параметрів, мають вигляд

$$\begin{aligned} C_{s(\kappa+1)} &= B_{\kappa} C_{s(\kappa)} + C_{\kappa+1}^{-1} H_{\kappa+1}^T C_{\theta(\kappa+1)} (\theta_{sy(\kappa+1)} - \theta_{s0(\kappa+1)}), \\ C_{\kappa+1} &= C_{0(\kappa+1)} + H_{\kappa+1}^T C_{\theta(\kappa+1)} H_{\kappa+1} = (B_{\kappa} C_{\kappa}^{-1} B_{\kappa}^T + Q_{\kappa})^{-1} + C'_{y(\kappa+1)}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\theta_{s0(\kappa+1)} = H_{\kappa+1} B_{\kappa} C_{s(\kappa)}$  – прогнозоване значення вектора спостережуваних параметрів;  $\theta_{sy(\kappa+1)}$  – оцінка значення параметра розстроювання умови Брегга  $q$  на  $\kappa+1$  кроці спостереження;  $C'_{y(\kappa+1)}$  – матриця точності поточного вимірювання.

Моделі зміни інформаційних параметрів поділяються на детерміновані та стохастичні. Спостережувані процеси зміни швидкості звуку в силу турбулентних процесів, що відбуваються в атмосфері, є випадковими процесами. Отже, для лінійної обробки інформації, отриманої за допомогою радіоакустичної системи, доцільно користуватися стохастичними моделями. Залежно від стану атмосфери слід вибирати, наприклад, модель з незалежними першими приростами або з незалежними другими приростами, або використовувати якусь іншу стохастичну модель.

Виходячи з результатів статистичного комп'ютерного моделювання слідує, що в якості моделі мінливого параметра оптимального лінійного фільтра системи РАЗ доцільно використовувати стохастичну модель з незалежними першими приростами. На рис. 6 показаний результат фільтрації профілю швидкості звуку при використанні цієї моделі.

Профілі, отримані в результаті фільтрації, характеризуються меншою дисперсією ніж початкові, що свідчить про зменшення похибок вимірів швидкості звуку, а значить, стохастична модель з незалежними першими приростами адекватно характеризує процес зміни швидкості звуку і її доцільно використовувати для лінійної фільтрації оцінок швидкості звуку в атмосфері.

Використання моделі з другими незалежними приростами навпаки вносить додаткову похибку в оцінку температурних профілів атмосфери, бо профілі, отримані в результаті фільтрації з використанням такої моделі характеризуються більшою дисперсією, ніж початкові. Детерміновані моделі не адекватні процесу зміни швидкості звуку з висотою в атмосфері, а фільтр з використанням детермінованої моделі характеризується «розбіжністю», тобто в певний момент практично не реагує на зміни профілю.

У різних місцях, на різних висотах атмосфери і в різний час доби процес зміни швидкості звуку може бути описаний різними математичними моделями, тому можлива ситуація, коли модель інформаційного процесу, що лежить в основі оптимального лінійного фільтра, буде обрана невірно, також не представляється можливим точно вибрати значення параметрів оптимального лінійного фільтра.

В роботі проаналізовані структурна та параметрична чутливості лінійного фільтра систем РАЗ при використанні моделей з незалежними першими і другими приростами. Показано, що в умовах невизначеності, при вирішенні питання про те, яку модель зміни інформаційного параметра (модель з незалежними першими

чи другими приростами) слід покласти в основу оптимального лінійного фільтра системи РАЗ, краще орієнтуватися на модель з незалежними першими приростами, а при виборі значення параметру оптимального лінійного фільтра системи РАЗ необхідно керуватися правилом вибору значення параметра про «запас», коли вибране значення параметра дещо більше реального – це краще, ніж коли вибране значення параметра дещо менше реального.

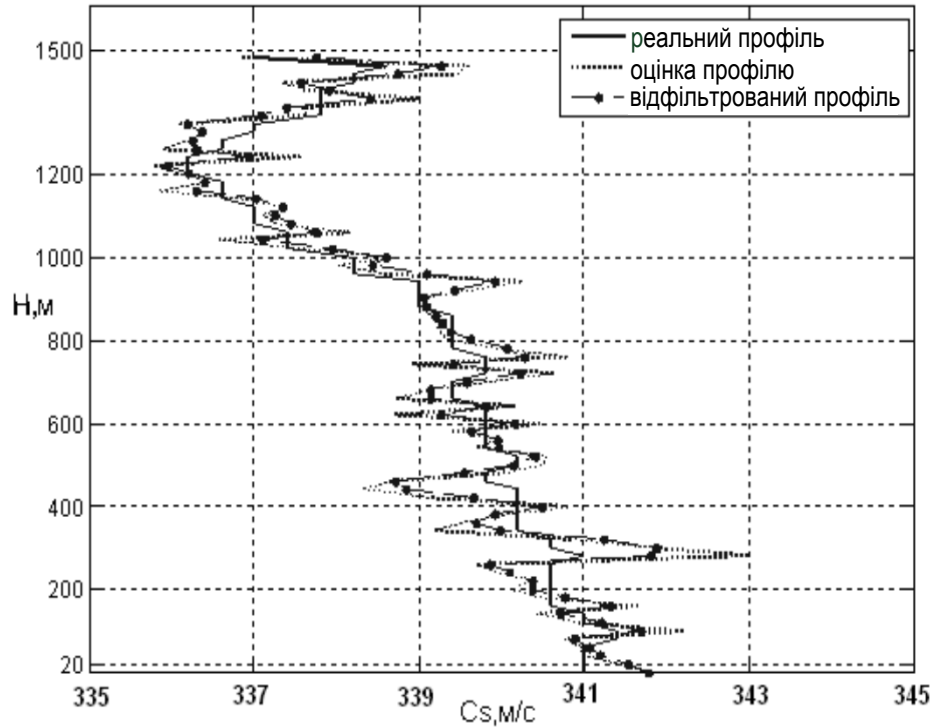


Рис. 6 Результат фільтрації профілю швидкості звуку при використанні моделі з незалежними першими приростами

У п'ятому розділі запропонована методика оцінки потенційної якості результатів вимірювання параметрів сигналів та атмосфери слідкувальним методом. Показано вплив енергетичного характеру параметра  $q$  на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери.

Вираз для оцінки потенційної точності вимірювань параметрів атмосфери слідкувальною системою РАЗ має вигляд

$$D_E(q_0) = \left[ \frac{\partial^2 S(q_1, q_2)}{\partial q_1 \partial q_2} \right]_{q_0}^{-1}, \quad (8)$$

де  $q_0$  – параметр розстроювання умови Брегга, при якому формується розсіяний на акустичній посилці радіо сигнал;  $S(q_1, q_2)$  – радіоакустична ненормована сигнальна функція, що являє собою функцію взаємної кореляції

вхідного корисного сигналу  $S(t, q_1)$  і опорного сигналу  $S(t, q_2)$  оптимального приймача

$$S(q_1, q_2) = \left| \int_0^T S(t, q_1) S(t, q_2) dt \right|. \quad (9)$$

На рис. 7 показано вигляд сигнальної функції  $S(q_1, q_2)$  при використанні простих зонduючих сигналів з прямокутними огинаючими, а на рисунку 8 залежність дисперсії оцінок  $D_E(q_0)$  від параметру  $q_0$  при відношенні сигнал/шум  $2E/N_0 = 100$ .

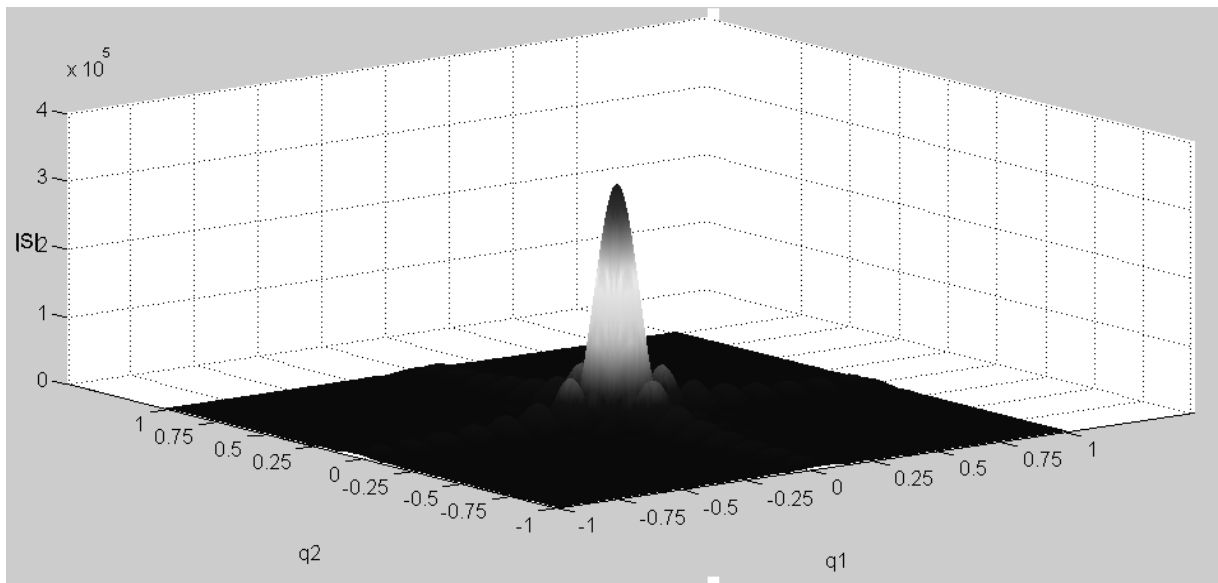


Рис. 7 Сигнальна функція  $S(q_1, q_2)$  при використанні простих зонduючих сигналів з прямокутними огинаючими

При збільшенні параметра  $q_0$  дисперсія  $D_E$  спочатку зменшується, а потім має тенденцію до зростання. Менші значення дисперсії  $D_E$  в районі значень  $q_0 = 0$  обумовлені тим, що зі збільшенням параметра розстроювання умови Брегга спостерігається ускладнення структури відображеного радіосигналу, оскільки має місце кутова модуляція сигналу при відбитті від акустичної посилки.

Збільшення дисперсії  $D_E$  після певного значення  $q_0$  пов'язано з тим, що оцінюваний параметр є енергетичним і коли енергії опорного і відбитого сигналів стають досить малими, флуктуаційна помилка вимірювань стає значною.

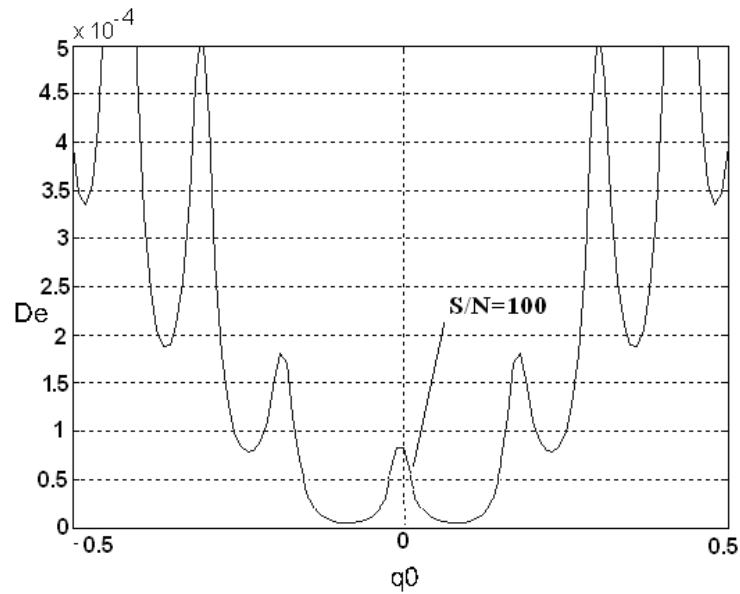


Рис. 8 Залежність дисперсії  $D_E(q_0)$  оцінки енергетичного параметра від параметру  $q_0$ , при якому був сформований розсіяний на акустичній посилювачі радіо сигнал, при використанні зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими та відношенні сигнал/шум  $2E/N_0 = 100$

Якщо виконувати корекцію потужності сигналів  $S(t, q_1)$  і  $S(t, q_2)$ , то залежність  $D_E(q_0)$  вже не матиме тенденцію до зростання після певного значення  $q_0$  (рис. 9).

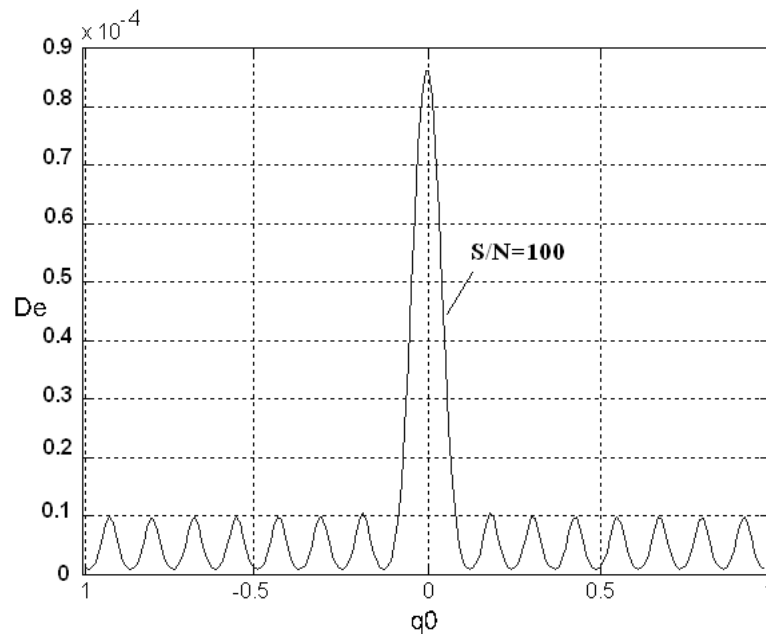


Рис. 9 Залежність дисперсії оцінки параметра  $q$  при використанні зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими за умови корекції потужності сигналів  $S(t, q_1), S(t, q_2)$  та відношенні сигнал/шум  $2E/N_0 = 100$



Крива залежності  $D_E(q_0)$  (рис. 9) має максимум, коли вхідний сигнал має значення параметра розстроювання умови Брегга  $q_0 = 0$ . При збільшенні значення  $q_0$  дисперсія  $D_E$  змінюється в зазначених межах вже не перевищуючи максимального значення на графіку, що свідчить про те, що тенденція зростання дисперсії  $D_E$  повністю зумовлена тим, що параметр  $q$  є енергетичним.

Згідно з графіками (рис. 8 - 9) величина дисперсії оцінки параметра розстроювання умови Брегга, отриманої с використанням слідкувального методу, для точок в діапазоні  $[-0.1, 0.1]$  за умови використання зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими становить  $0.05 \cdot 10^{-4} - 0.85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2}$ , що при вимірюванні температури відповідає дисперсії  $0.046 - 0.22 \text{ }^\circ\text{C}^2$ . Дисперсія оцінки температури повітря системами РАЗ при використанні відомих методів за умови використання однакових за формою та потужністю сигналів, що і в запропонованому методі, складає не менше ніж  $0.22 \text{ }^\circ\text{C}^2$ . Гірша точність роботи відомих методів пов'язана з тим, що вони виконують оцінку температури повітря тільки за умови виконання в атмосфері умови Брегга, тобто коли параметр розстроювання умови Брегга  $q_0 = 0$ , а в такому випадку потенційно можлива точність є найменшою. В умовах, коли параметр розстроювання умови Брегга відрізняється від нуля, то разом з тим, що дисперсія оцінки температури повітря при використанні відомих методів стає більшою, виникає систематична похибка в оцінці температури повітря. В умовах, коли параметр розстроювання умови Брегга відрізняється від нуля, дисперсія оцінки температури при використанні запропонованого методу навпаки стає меншою, а за певних значень параметра розстроювання умови Брегга, за рахунок того, що форма розсіяного сигналу стає досить складною, дисперсія оцінки складає  $0.046 \text{ }^\circ\text{C}^2$ .

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача вдосконалення слідкувального методу обробки сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери, що враховує перетворення, яким піддається радіосигнал при поширенні в локаційному радіоакустичному каналі, виконує оптимальну лінійну обробку отримуваних оцінок параметрів атмосфери та забезпечує підвищення точності та оперативності вимірювання параметрів атмосфери.

При цьому отримані такі основні результати:

1. Проаналізовано існуючі системи РАЗ атмосфери та використовувані в них методи обробки розсіяних на акустичній посиленні сигналів. Показано, що застосовувані нині в системах РАЗ алгоритми обробки сигналів не адекватні процесам, що відбуваються в локаційному каналі, і характеризуються систематичною похибкою оцінки температури повітря. По-перше, не враховується

зміна форми (структури) випромінюваного сигналу при розсіянні на звуковій посилювачі, по-друге, не береться до уваги залежність енергії розсіяного радіосигналу від величини швидкості звуку.

2. Запропонований слідкувальний метод обробки розсіяних сигналів систем РАЗ, що враховує перетворення, яким піддається радіосигнал при поширенні в локаційному радіоакустичному каналі і включає оптимальну лінійну обробку отримуваних оцінок параметрів атмосфери. Суть роботи алгоритму полягає в обчисленні кореляційних інтегралів між прийнятою реалізацією відбитого радіосигналу і парою опорних коливальних, сформованих з використанням функції розсіяння. Такий алгоритм обробки дозволяє усунути систематичні похибки у вимірюванні параметрів атмосфери радіоакустичними системами, пов'язані зі зміною параметра розстроювання умови Брегга на трасі поширення зондуючих сигналів та підвищує оперативність вимірювання параметрів атмосфери.

3. Виконано аналіз властивостей дискримінатора, що входить до складу слідкувального пристрою. Показано, що форма дискримінаційної характеристики пристрою, залежить від видів зондуючих сигналів та визначається характеристиками пари поточних опорних сигналів пристрою. Залежно від значень параметрів розстроювання умови Брегга та пари опорних сигналів може змінюватись як довжина, так і крутизна лінійної ділянки дискримінаційної характеристики.

При використанні простих зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими діапазон зміни оцінюваного параметра, в межах якого алгоритм є працездатним, становить  $[-0.1, 0.1]$ , що відповідає діапазону зміни температури повітря  $40^{\circ}\text{C}$ .

4. Запропоновано використовувати метод оптимальної лінійної фільтрації в системах РАЗ для обробки послідовності оцінок параметрів атмосфери. Показана його ефективність. Проведено аналіз моделей оптимальної лінійної фільтрації. Показано, що серед детермінованих та стохастичних моделей в якості моделі мінливого параметра оптимального лінійного фільтра системи РАЗ доцільно використовувати стохастичну модель з незалежними першими приростами.

5. Вивчена параметрична та структурна чутливості оптимального лінійного фільтра. В умовах невизначеності, при вирішенні питання про те, яку модель зміни інформаційного параметра слід покласти в основу оптимального лінійного фільтра системи РАЗ, краще орієнтуватися на більш «грубі» моделі розглянутих процесів. В умовах невизначеності, при вирішенні питання про те, які значення параметрів оптимального лінійного фільтра системи РАЗ слід вибирати з метою забезпечення більш ефективного процесу фільтрації, необхідно керуватися правилом вибору значення параметра про «запас», коли вибране значення параметра дещо більше реального – це краще, ніж коли вибране значення параметра дещо менше реального.

6. Запропоновано метод оцінки потенційної якості результатів вимірювання параметрів сигналів та атмосфери слідкувальним методом, що полягає в аналізі сигнальної функції пари зондуючих акустичного та електромагнітного коливань.

Показано, що потенційна точність вимірювання температури запропонованим методом залежить від значення параметра розстроювання умови Брегга, при якому формується прийнятий радіосигнал. Зі збільшенням значення параметра розстроювання умови Брегга потенційна точність спочатку зростає, а потім має тенденцію до спаду. Зростання потенційної точності на початку обумовлено тим, що зі збільшенням параметра розстроювання умови Брегга спостерігається ускладнення структури розсіяного радіосигналу. Спад потенційної точності після певного значення параметра розстроювання умови Брегга пов'язано з тим, що оцінюваний слідкувальною системою РАЗ параметр є енергетичним і коли енергії опорного і відбитого сигналів стають досить малими, флуктуаційна помилка вимірювань стає значною.

7. Показано, що для простих зондуючих сигналів з прямокутними огинаючими при виконанні умови Брегга в атмосфері, тобто коли параметр розстроювання умови Брегга  $q_0 = 0$ , точність оцінок температури повітря, отримуваних при використанні запропонованого методу і існуючих, однакова (дисперсія складає  $0.22 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ ). Перевага в точності оцінок температури повітря запропонованим методом виявляється при значеннях параметра розстроювання умови Брегга  $q_0$  відмінних від нуля. В той час, як точність оцінок температури повітря існуючими методами стає гіршою при зростанні  $q_0$ , точність оцінок запропонованим методом навпаки стає вищою (дисперсія досягає значення  $0.046 \text{ } \text{C}^2$ ).

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Карташов В.М. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы / В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Д.Н. Куля и др. // Монография. – Харьков, 2014. – С. 9-67.

2. Карташов В.М. Синтез и анализ дискриминатора следящего устройства систем радиоакустического зондирования атмосферы / В.М. Карташов, Д.Н. Куля // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.– Харьков, 2012. – №171. – С. 234-239.

3. Карташов В.М. К вопросу о возможности регистрации влажности воздуха при корреляционной обработке сигналов системы радиоакустического зондирования / В.М. Карташов, С.И. Бабкин., Д.Н. Куля // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков, 2013. – №172. – С. 67-71.

4. Карташов В.М. Выбор модели изменения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы /

В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир, Е.Г. Толстых // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков, 2013. – №173. – С. 63-68.

5. Карташов В.М. Потенциальная точность оценки информационного энергетического параметра сигнала в системах радиоакустического зондирования атмосферы / В.М. Карташов, Д.Н. Куля, Е.Г. Толстых // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков, 2015. – 182. – С. 13-18.

6. Карташов В.М. Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем / В.М. Карташов, Д.Н. Куля, С.В. Пащенко // Восточно-Европейский ЖУРНАЛ передовых технологий – Харьков, 2012. – № 4/9(58). – С. 57-61.

7. Карташов В.М. Особенности рассеяния радиоволн на сложных акустических сигналах при радиоакустическом зондировании атмосферы / В.М. Карташов, С.В. Пащенко, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир // Восточно-Европейский ЖУРНАЛ передовых технологий – Харьков, 2012. – № 4/9(58). – С. 64-68.

8. Карташов В.М. Анализ и синтез алгоритмов обработки сигналов в системах радиоакустического зондирования атмосферы / В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир // Радиотехнические и телекоммуникационные системы – г. Муром, Россия, 2013. – №4(12). – С. 63-68.

9. Kartashov V.M. Selection of the Model for Varying Speed of Sound for the Optimal Linear Filter of Atmosphere Radio Acoustic Sounding Systems / V.M. Kartashov, D.M. Kulia, M.V. Kushnir, E.G. Tolstyh // Telecommunications and Radio Engineering – New York, 2014. – №73(9). – P. 803-812 (Англомовний переклад статті [4]).

10. Kartashov V.M. On the Possibility of Registration of Humidity at the Correlation Signal Processing Systems for Radio Acoustic Sounding / V.M. Kartashov, S.I. Babkin, D.N. Kulya // Telecommunications and Radio Engineering – New York, 2014. – №73(14). – P. 1293-1300.

11. Kartashov V.M. Synthesis and Analysis of the Tracking Device Discriminator of the Atmosphere Radio Acoustic Sounding Systems / V.M. Kartashov, D.N. Kulya // Telecommunications and Radio Engineering – New York, 2014. – №73(5). – P. 467-474 (Англомовний переклад статті [2]).

12. Супрун А.А. Робастный алгоритм подавления помех в сканирующей антенной решетке/ А.А. Супрун, Д. Н. Куля // 7-я международная молодежная НТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ - 2011». – Севастополь: севНТУ, 2011. – С. 54.

13. Куля Д.Н. Следящий алгоритм систем радиоакустического зондирования атмосферы/ Д.Н. Куля // 8-я международная молодежная НТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ – 2012». – Севастополь: севНТУ, 2012. – С. 86.

14. Куля Д.Н. Анализ показателей качества систем радиоакустического зондирования атмосферы / Д.Н. Куля, А.В. Волох // 15-й Международный

молодёжный форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». Сб. мат. форума Т.3. – Харьков: ХНУРЭ. 2011. – С. 185-186.

15. Куля Д.Н. Особенности следящей системы радиоакустического зондирования атмосферы / Д.Н. Куля // 16-й Международный молодёжный форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». Сб. мат. форума Т.3. – Харьков: ХНУРЭ. 2012. – С. 122-123.

16. Куля Д.Н. Линейная оптимальная фильтрация оценок скорости звука в системах радиоакустического зондирования атмосферы / Д.Н. Куля // 17-й Международный молодёжный форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». Сб. мат. форума Т.3. – Харьков: ХНУРЭ. 2013. – С. 122-123.

17. Карташов В.М. Анализ методов обработки сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы / В. М. Карташов, С. И. Бабкин, С. В. Пащенко, Д. Н. Куля // 4-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2011. – Т.1. Конф. "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии" Ч.1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011. – С. 241-243.

18. Куля Д.Н. Особенности обработки сигналов в современных системах радиоакустического зондирования атмосферы / Д.Н. Куля // Материалы X Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2012. – С. 163-165.

19. Карташов В.М. Метод управления параметрами систем радиоакустического зондирования атмосферы / В.М. Карташов, М.В. Кушнир, Д.Н. Куля // Физика. Ежемесячный научный журнал. –Томск, 2013. – Т.56. №9/2 – С. 206-208.

20. Карташов В.М. Использование алгоритма оптимальной линейной фильтрации для обработки результатов измерений систем радиоакустического зондирования атмосферы / В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир // Физика. Ежемесячный научный журнал. – Томск, 2013. – Т.56.№9/2 – С. 232-234.

21. Карташов В.М. Синтез дискриминатора систем радиоакустического зондирования атмосферы / В.М. Карташов, Д.Н. Куля // 22-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. – Севастополь 2012. – С. 1041-1042.

22. Карташов В.М. Особенности обработки результатов измерений систем радиоакустического зондирования атмосферы с использованием фильтра Калмана / В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир // 23-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Материалы конференции. – Севастополь 2013. – С. 1136-1137.

23. Kartashov V.M. The signal processing algorithms study of atmospheric radioacoustic sensing systems / V.M. Kartashov, D.N. Kulia // 16<sup>th</sup> International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing (ISARS). – Boulder, Kolorado, 2012. – P.252-254.

24. Карташов В.М. Корреляционная обработка сигналов системы температурного радиоакустического зондирования атмосферы/ В.М. Карташов, С.И. Бабкин., Д.Н. Куля // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.– Харьков, 2012. – №170. – С. 106–111.

25. Патент на винахід № 105052. Україна. МПК G01S 13/95. Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури / В.М.Карташов, С.І. Бабкин, С.В. Пашенко, Д.М. Куля. – № а 2011 07002; Заявлено 03.06.2011; Опублік. 27.02.2012, Бюл.№4. – 5. іл.

26. Патент на винахід № 97612. Україна. МПК G01S 13/95. Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури / В.М.Карташов, С.І. Бабкин, Д.М. Куля. – № а 2012 02556; Заявлено 03.03.2012; Опублік. 10.04.2014, Бюл.№7. – 7. іл.

27. Рішення про видачу патенту. Україна. Пристрій для дистанційної реєстрації вертикального профілю температури атмосферного повітря / В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Д.М. Куля – № а 2013 04840 від 6.05.15.

## АНОТАЦІЯ

**Куля Д. М. Удосконалення слідкувальних методів обробки сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук по спеціальності 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2016.

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача вдосконалення слідкувальних методів обробки сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери, що враховують перетворення, яким піддається радіосигнал при поширенні в локаційному радіоакустичному каналі, виконують оптимальну лінійну обробку отримуваних оцінок параметрів атмосфери та забезпечують підвищення точності та оперативності вимірювання параметрів атмосфери.

Проаналізовано існуючі системи РАЗ атмосфери та використовувані в них методи обробки розсіяних на акустичній посиленні сигналів. Показано, що застосовувані нині в системах РАЗ алгоритми обробки сигналів не адекватні процесам, що відбуваються в локаційному каналі, і характеризуються систематичною похибкою оцінки температури повітря. По-перше, не враховується зміна форми (структури) випромінюваного сигналу при розсіянні на звуковій посиленні, по-друге, не береться до уваги залежність енергії розсіяного радіосигналу від величини швидкості звуку.

Запропонований в дисертації слідкувальний алгоритм обробки розсіяних сигналів систем РАЗ враховує перетворення, яким піддається радіосигнал при поширенні в локаційному радіоакустичному каналі, виконує оптимальну лінійну обробку отримуваних оцінок параметрів атмосфери та забезпечує підвищення

точності та оперативності вимірювання параметрів атмосфери. Суть роботи алгоритму полягає в обчисленні кореляційних інтегралів між прийнятою реалізацією відбитого радіосигналу і двома опорними коливаннями, сформованими з використанням функції розсіяння. Такий метод обробки дозволяє усунути систематичні похибки у вимірюванні параметрів атмосфери радіоакустичними системами, пов'язані зі зміною параметра розстроювання умови Бреґга на трасі поширення зондуючих сигналів.

Виконано аналіз властивостей дискримінаційної характеристики пристрою, що реалізує слідкувальний алгоритм. Показано, що форма дискримінаційної характеристики визначається характеристиками пари поточних опорних сигналів. Залежно від значень параметрів розстроювання умови Бреґга пари опорних сигналів може змінюватись як довжина, так і крутизна лінійної ділянки дискримінаційної характеристики.

Проведено аналіз розробленого слідкувального методу за умови використання простих зондувальних сигналів з прямокутними огинаючими. Діапазон зміни оцінюваного параметра, в межах якого алгоритм є працездатним становить  $[-0.1, 0.1]$ , що відповідає діапазону зміни температури повітря  $40^{\circ}\text{C}$ .

В роботі запропоновано використовувати метод оптимальної лінійної фільтрації для обробки послідовності оцінок параметрів атмосфери. Показана їх ефективність. Проведено аналіз і вибір моделей оптимальної лінійної фільтрації. Показано, що серед детермінованої та стохастичних моделей в якості моделі мінливого параметра оптимального лінійного фільтра системи РАЗ доцільно використовувати стохастичну модель з незалежними першими приростами.

Запропонована методика оцінки потенційної якості результатів вимірювання параметрів сигналів та атмосфери слідкувальним методом. Показано, що потенційна точність вимірювання температури запропонованим методом залежить від значення параметра розстроювання умови Бреґга, при якому формується прийнятий радіосигнал. Зі збільшенням розстроювання умови Бреґга потенційна точність спочатку зростає, а потім має тенденцію до спаду. Зростання потенційної точності на початку говорить про те, що при наявності розстроювання умови Бреґга потенційна точність вище, ніж при виконанні умови Бреґга.

**Ключові слова:** радіоакустична слідкувальна система, акустичний канал, потенційна точність, синтез сигналів, оптимальна лінійна обробка, кореляційна обробка.

## АНОТАЦИЯ

**Куля Д. Н. Усовершенствование следящих методов обработки сигналов систем радиоакустического 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, 2016.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача совершенствования следящих методов обработки сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы, которые учитывают преобразования, которым подвергается радиосигнал при распространении в локационном радиоакустическом канале, выполняют оптимальную линейную обработку получаемых оценок параметров атмосферы и обеспечивают повышение точности и оперативности измерения параметров атмосферы.

Предложенный в диссертации следящий метод обработки рассеянных сигналов систем РАЗ учитывает преобразования, которым подвергается радиосигнал при распространении в локационном радиоакустическом канале, выполняет оптимальную линейную обработку получаемых оценок параметров атмосферы и обеспечивает повышение точности и оперативности измерения параметров атмосферы. Суть работы алгоритма заключается в вычислении корреляционных интегралов между принятой реализацией отраженного радиосигнала и двумя опорными колебаниями, сформированными с использованием функции рассеяния. Такой метод обработки позволяет устранить систематические погрешности в измерении параметров атмосферы радиоакустическими системами, связанные с изменением параметра расстройки условия Брэгга на трассе распространения зондирующих сигналов.

В работе предложено использовать механизм оптимальной линейной фильтрации для обработки последовательности оценок параметров атмосферы. Показана их эффективность. Проведен анализ и выбор моделей оптимальной линейной фильтрации. Показано, что среди детерминированной и стохастических моделей в качестве модели изменяющегося параметра оптимального линейного фильтра системы РАЗ целесообразно использовать стохастическую модель с независимыми первыми приращениями. Предложена методика оценки потенциальной точности результатов измерения параметров сигналов и атмосферы следящим методом.

**Ключевые слова:** радиоакустические следящие системы, акустический канал, потенциальная точность, синтез сигналов, оптимальная линейная обработка, корреляционная обработка.



**ANNOTATED**

**Kulia D. M. Improvement of trace signal processing methods of radio acoustic atmosphere sensing systems.** The manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.12.17 – radio and television systems – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2016.

The problem of improving of tracking signal processing techniques of atmospheric radio acoustic sounding systems is solved in thesis. Suggested technique take into account transformations of radio signal that happen when signal propagates in the locational radio acoustic channel, performs optimum linear processing of the estimates of the atmospheric parameters and provides increasing of the accuracy and efficiency of atmospheric parameters measurement.

Suggested in thesis tracking method of scattered signals processing takes into account the transformations that happen when signal propagates in the locational radio acoustic channel, performs optimum linear processing of the estimates of the atmospheric parameters and provides increasing of the accuracy and efficiency of atmospheric parameters measurement. The point of the algorithm is to calculate the correlation integrals between the received radio signal and two reference vibrations that was generated using the scattering function. Such processing method makes it possible to eliminate systematic errors in the measurement of the atmosphere parameters using radio acoustic systems that are associated with the change of Bragg condition detuning parameter along the propagation path of the sounding signals.

Thesis proposes to use the mechanism of optimal linear filtering for processing the sequence of estimates of atmospheric parameters. There is demonstrated their efficiency. There are done the analysis and the choice of models of optimal linear filtering. It is shown that among the deterministic and stochastic models there is advisable to use the stochastic model with independent first incremental as a changed parameter model of the optimal linear filter in the radio acoustic systems.

The method of assessing of the potential accuracy of atmospheric parameters measurements is suggested.

Keywords: the tracking radioacoustic system, the acoustic channel, the potential accuracy, the synthesis of signals, optimum linear processing, the correlation processing.

Підп. до друку 27.10.16.  
Умов. друк. арк. 1,2.  
Зам. 1/27 від 27.10.16.

Формат 60x84 1/16.  
Тираж 100 прим.

Спосіб друку – ризографія.  
Ціна договірна.

Віддруковано в типографії ФОП Андреев К.В.  
61166, Харків, вул. Серпова, 4  
Свідоцтво про державну реєстрацію  
Серія В00 №966085 від 30.05.2003 р.  
[extraprint@mail.ua](mailto:extraprint@mail.ua)  
тел. 063-993-62-73