

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**Зубков Олег Вікторович**

УДК 621.396.96:534.88:551.501.8

**РОЗШИРЕННЯ ЗОНИ ОГЛЯДУ І ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНІЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСУ ВЕРТИКАЛЬНОГО  
РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРНОГО  
ПРИКОРДОННОГО ШАРУ**

05.12.17 - *радіотехнічні та телевізійні системи*

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2004

Дисертація є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Сідоров Генадій Іванович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки,  
завідувач кафедри “Радіоелектронні системи”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Баришев Ігор Володимирович**,  
Харківський національний аерокосмічний  
університет ім. М.С. Жуковського,  
завідувач кафедри “Проектування радіоелектронних  
систем літальних апаратів”

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Бабкін Станіслав Іванович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки,  
завідувач проблемної науково-дослідної лабораторії  
зондування атмосфери харківського національного  
університету радіоелектроніки

Провідна установа: ВАТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних  
вимірювань Мінпромполітики України

Захист відбудеться “19” травня 2004 р. о 13\_годині на засіданні  
Спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному уні-  
верситеті радіоелектроніки за адресою: 66061, м.Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного  
університету радіоелектроніки за адресою: 66061, м.Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий 16.04. 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради \_\_\_\_\_ Безрук В.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Значна увага сьогодні в усьому світі і у нашій країні приділяється проблемі вивчення фізики атмосферного прикордонного шару (АПШ) та удосконаленню методів і засобів його дослідження. Найбільш перспективними для цілей дослідження АПШ і вимірювання його характеристик є методи дистанційного вертикального зондування, а саме радіо-, акустичного і радіоакустичного. Слід зазначити, що першочергове призначення радіолокаційних систем вертикального зондування АПШ – контроль швидкості вітру, його напрямку, температури, ступеня турбулентності атмосфери над злітно-посадочною смугою з метою забезпечення безпеки зліту і приземлення літаків. Зазначені вище метеовеличини є основними для вимірювання відповідно до вимог автоматизованих систем керування повітряним рухом (АСКПР). Методи радіо- і радіоакустичного вертикального зондування дозволяють виконувати вимірювання швидкості вітру, його середньоквадратичних пульсацій, температури і т.і. у широкому діапазоні висот, не вимагають, на відзнаку від контактних методів, встановлення спеціальних метеорологічних щогл, запуску зондів тощо. Середньоквадратичні похибки вимірювання метеовеличин дистанційними методами не перевищують похибок контактного вимірювання. Зростаючі вимоги до безпеки польотів авіації, зменшення похибок вимірювання та вартості подібних систем в умовах збільшення інтенсивності зліту і приземлення обумовлюють необхідність удосконалення методів і засобів дистанційного зондування АПШ. Основна наукова тенденція розширення функціональних можливостей систем дистанційного зондування атмосфери полягає в удосконаленні методів і алгоритмів первинної та вторинної обробки прийнятих радіосигналів. Застосування більш досконалих методів первинної обробки радіосигналів, прийнятих радіолокаційними системами вертикального зондування атмосфери, дозволяє знизити похибки вимірювання профілів метеовеличин, розширити область їх визначення за рахунок підвищення спектрального розрізнення, зниження методичних похибок, одержувати достовірні оцінки метеовеличин при малих відношеннях сигнал/завада. Оптимізація алгоритмів, покладених в основу методів обробки радіосигналів, і самих методів за критерієм мінімуму числа математичних операцій дозволяє зменшити час вимірювання, що особливо важливо для підвищення темпу і безпеки зліту і приземлення літаків у сучасному аеропорті. Значну роль у вирішенні проблеми удосконалення методів і засобів дистанційного вертикального радіолокаційного зондування атмосфери відіграє комплексування систем зондування, застосування яких у сукупності дозволяє збільшити перелік вимірюваних метеопараметрів, розширити просторову область їх визначення, зменшити похибки вимірювання. Тому актуальність теми дисертаційної роботи визначається необхідністю удосконалення методів первинної та вторинної обробки радіосигналів у радіолокаційних комплексах вертикального зондування атмосферного прикордонного шару у зв'язку із зростанням вимог автоматизованих систем керування повітряним рухом до оперативності визначення метеопараме-

трів, розширення просторової області їх дистанційного вимірювання та підвищення точності, зменшення собівартості виробництва та експлуатації вимірювальних радіолокаційних комплексів.

Такий шлях не вимагає істотних конструктивних змін в апаратній частині і збільшення енергетичного потенціалу радіолокаційних систем дистанційного зондування, тобто економічно ефективний у порівнянні з іншими, що особливо актуально для України.

До сказаного варто додати, що вже понад 20 років у Харківському національному університеті радіоелектроніки існують і розвиваються наукові школи, що займаються створенням і удосконаленням методів і способів радіо- і радіоакустичного зондування атмосфери (РАЗ), а також засобів обробки прийнятих радіосигналів. Дана робота є продовженням наукових досліджень, що виконуються колективами вчених цих наукових шкіл.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з дослідженнями, виконаними в Харківському національному університеті радіоелектроніки. Це дослідження з держбюджетної теми №116.1 “РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І РОЗРОБКА ШЛЯХІВ СТВОРЕННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ СТАНУ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА І ПЕРЕДАЧІ ОТРИМАНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ” відповідно до тематичного плану Міністерства освіти та науки України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення оперативності вимірювання профілів метеопараметрів в атмосферному прикордонному шарі і розширення просторової області їх визначення комплексами вертикального радіолокаційного зондування, що містять доплерівський радіопрофайлер і радіоакустичну систему.

**Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:**

- удосконалення методів первинної обробки радіосигналів у доплерівських радіопрофайлерах, а також методів вторинної обробки профілів метеовеличин у комплексах вертикального наземного радіолокаційного зондування, що містять доплерівський радіопрофайлер і радіоакустичну систему;
- доказ можливості застосування методів прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування для екстраполяції профілів швидкості вітру з метою розширення області визначення метеопараметрів АПШ доплерівськими радіопрофайлерами;
- удосконалення методів розширення просторової області визначення профілів температури комплексом вертикального радіолокаційного зондування і зменшення флуктуаційної похибки визначення температури системою РАЗ;
- апробація удосконалених методів обробки на реалізаціях реальних радіосигналів, отриманих у доплерівських радіолокаційних системах вертикального зондування АПШ, і на імітаційних моделях цих сигналів.

**Об'єкт дослідження** – процеси обробки інформації в комплексі вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару, що включає доплерівський радіопрофайлер і радіоакустичну систему.

**Предмет дослідження** – методи розширення області визначення профілів метеовеличин, підвищення оперативності обробки інформації і зменшення похибок вимірювання метеовеличин комплексом вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару.

**Методи дослідження:**

- евристичний, з використанням якого були накреслені шляхи підвищення оперативності обробки прийнятих радіосигналів у радіолокаційних системах вертикального зондування атмосферного прикордонного шару і розширення функціональних можливостей цих систем;
- теоретичний та кількісний аналіз, що дозволив створити модель комплексного сигналу на виході квадратурного детектора доплерівського радіопрофайлера з заданими параметрами спектральної щільності потужності (СЩП), обґрунтувати переваги застосування і довести працездатність запропонованих комбінованих методів параметризації СЩП радіосигналів і просторового прогнозування метеопараметрів, удосконалити алгоритм адаптивного керування частотою радіопередавача в системі РАЗ з метою підстроювання частоти випромінювання під умову Бреґґа;
- методи спектрального, параметричного аналізу на базі моделей авторегресії і статистичної обробки експериментальних даних, з використанням яких доведена ефективність і переваги розроблених методів підвищення оперативності і зниження похибок вимірювання метеовеличин, розширення області їх визначення в радіолокаційних системах вертикального зондування атмосфери.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано використання комбінацій методів моментів і найменших квадратів у поєднанні з авторегресійним методом параметричного оцінювання перших двох моментів СЩП при обробці радіосигналів, прийнятих доплерівськими радіопрофайлерами, що входять у комплекси керування повітряним рухом. Досягнуто істотне (у 2.5-10 разів) скорочення часу параметризації вибіркового спектра і часу його обчислення (1.2...1.7 разів). Доведено, що у запропонованих комбінованих методах при використанні модифікованого коваріаційного алгоритма обчислення вибірових коефіцієнтів моделі авторегресії досягається максимальне зменшення часу обробки прийнятих радіосигналів і мінімальна флуктуаційна похибка визначення швидкості вітру і його середньоквадратичних пульсацій у порівнянні з іншими алгоритмами обчислення коефіцієнтів моделі авторегресії. Для оцінювання СЩП доцільно застосовувати моделі авторегресії 6-8 порядків.
2. Вперше запропоновано застосування методів прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування для розв'язку задачі екстраполяції профілів швидкості вітру і його напрямку за межею області достовірного вимірювання цих метеовеличин доплерівськими радіопрофайлерами.

3. Доведено можливість зменшення флуктуаційної похибки визначення швидкості вітру і його середньоквадратичних пульсацій при застосуванні неklasичних методів спектрального аналізу (СА) на базі моделей авторегресії. Доведено, що використання модифікованого коваріаційного алгоритма забезпечує одержання оцінок швидкості вітру і його середньоквадратичних пульсацій з мінімальною флуктуаційною похибкою. Також доведено, що моделі авторегресії 6-8 порядків адекватно описують реальні радіосигнали, що приймаються доплерівськими радіопрофайлерами.
4. Запропоновано та обґрунтовано удосконалений алгоритм автоматичного керування частотою радіопередавача системи РАЗ у комплексах вертикального радіолокаційного зондування для виконання умови Брегга у всьому діапазоні висот достовірного визначення профілів температури, а також розширення області визначення температури. Обґрунтовано вибір діапазону частот акустичного випромінювання і довжини акустичного пакета, за яких забезпечується найвища ефективність автопідстроювання частоти радіовипромінювання системи РАЗ.

#### **Практична цінність отриманих результатів.**

1. Доведено, що запропоновані комбіновані методи параметризації спектральної щільності потужності радіосигналів, прийнятих доплерівськими радіопрофайлерами, мають високу оперативність і надійність при обробці реальних радіосигналів, ідентичність результатів вимірювання швидкості вітру з аналогічними результатами, отриманими при застосуванні традиційних методів спектрального аналізу і параметризації спектра, та дозволяють зменшити флуктуаційні похибки оцінок середньоквадратичних пульсацій швидкості вітру в порівнянні з класичними методами.
2. Розширено діапазон вірогідного визначення горизонтальної складової швидкості вітру і його напрямку на величину, кратну розрізняльній здатності (зокрема на 58 м при висотному розрізюванні 58 м розглянутого типу радіопрофайлеров) з якістю, що задовольняє вимоги автоматизованих систем керування повітряним рухом. При зондуванні атмосфери радіопрофайлерами з більш високим висотним розрізненням варто очікувати збільшення числа кроків, на які робиться вірогідний прогноз з необхідною деталізацією процесів у діапазоні радіусів просторової кореляції, у межах якого відліки компонент швидкості вітру сильно корельовані.
3. Обґрунтовано вимоги до технічних параметрів комплексу вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару і до цифрового синтезатора радіочастоти, як елемента системи радіоакустичного зондування. Проведено імітаційне моделювання роботи комплексу і доведено, що завдяки удосконаленому способу адаптивного керування частотою радіопередавача системи РАЗ флуктуаційна похибка визначення температури теоретично може бути знижена на 5...20% у порівнянні з випадком, коли автопідстроювання відсутнє, та на 3...15% у порівнянні з традиційним алгоритмом в умовах ін-

тенсивного вітру ( $V_T=15$  м/с), коли при автопідстроюванні не враховується горизонтальне знесення акустичного пакету під дією вітру.

4. Результати роботи можуть бути використані для удосконалення радіолокаційних систем вертикального зондування АПШ, що забезпечують підвищення безпеки польотів різних аерокосмічних об'єктів, створення удосконалених систем дистанційного зондування атмосфери і розробки рекомендацій з їх експлуатації.

**Особистий внесок здобувача.** Особистий внесок здобувача в розробку способу формування імітаційного радіосигналу з заданими параметрами спектральної щільності потужності (див. роботу [1], виконану в співавторстві з Тихоновим В.А. і Сідоровим Г.І.) полягає в знаходженні аналітичного рішення системи рівнянь Юла-Уокера для випадку двомодового спектра радіосигналу. Також, на підставі результатів імітаційного моделювання з використанням ПЕОМ, здобувачем визначені середньоквадратичні відхилення вибіркового оцінок параметрів СЩП від заданих для випадків одномодового і двомодового спектрів.

Особистий внесок здобувача в зіставлення флуктуаційних похибок визначення перших двох моментів доплерівських варіацій відбитого від турбулентної атмосфери радіосигналу класичними і некласичними методами спектрального аналізу і параметризації спектральної щільності потужності (див. роботу [2], виконану в співавторстві з Олейніковим В.М.) полягає в наступному. Здобувачем синтезовано алгоритм проведення імітаційного моделювання і його програмна реалізація на ПЕОМ. Знайдені і зіставлені чисельні оцінки флуктуаційних похибок визначення перших двох моментів вибіркового спектральної щільності потужності, обчисленої з використанням швидкого перетворення Фур'є, періодограминого метода Уелча, за коефіцієнтами моделі авторегресії і параметризованої методами моментів та найменших квадратів.

Розробка комбінованих методів параметризації спектральної щільності потужності, їх апробація на реальних радіосигналах, отриманих із тропосферної РЛС вертикального зондування ХНУРЕ, та на імітаційних моделях цих сигналів, зіставлення результатів обробки при використанні традиційних методів і запропонованих виконана здобувачем без співавторів (див. роботу [3]).

Особистий внесок здобувача в вирішення задачі екстраполяції профілів швидкості вітру і його напрямків з якістю, що задовольняє вимогам автоматизованих систем керування повітряним рухом, (див. роботу [4], виконану в співавторстві із Сідоровим Г.І. і Величко Д.А.) полягає у висуванні ідеї про можливість екстраполяції профілів з використанням методів прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування на базі моделей авторегресії. Здобувачем виконана апробація способу з використанням реальних профілів швидкості вітру і його напрямку, визначені порядки моделі авторегресії і метод прогнозування, що забезпечують максимальну вірогідність прогнозів і мінімальні середньоквадратичні похибки прогнозування.

Розробка удосконаленого способу адаптивного керування частотою радіопередавача системи радіоакустичного зондування, встановленої в комплексі з

доплерівським радіопрофайлером, а також проведення імітаційного моделювання виконані здобувачем без співавторів (див. роботу [5]).

**Апробація результатів дисертації** проведена на міжнародних конференціях, на яких викладений наступний матеріал, що включений у дисертацію.

Ідея підвищення оперативності обробки радіосигналів у радіолокаційних комплексах вертикального зондування атмосфери і необхідність використання для спектрального аналізу моделей авторегресії обговорювалася на Другій Харківській конференції молодих вчених “Радіофізика і СВЧ електроніка” (Харків 2002, ІРЕ НАНУ).

Ідея екстраполяції в просторі профілів швидкості вітру і його напрямку з використанням методів прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування на базі моделей авторегресії, обговорювалася на Сьомому міжнародному молодіжному форумі “Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті” (Харків 2003).

Ідея удосконалення способу адаптивного керування частотою радіопередавача системи РАЗ для забезпечення виконання умови Брегга в межах усього діапазона висот визначення профілів температури радіолокаційними комплексами вертикального зондування атмосферного прикордонного шару обговорювалася на міжнародній конференції “Теорія і техніка передачі, прийому та обробки інформації” (Туапсе 2003).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 7 роботах, 5 з яких є статті у фахових виданнях з переліку, затвердженого ВАК України.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація містить вступ, 4 основних розділа, повний обсяг дисертації 219 сторінок, ілюстрації займають 26,5 сторінок, таблиці – 6,5 сторінок, список використаних літературних джерел містить 113 посилань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми удосконалення методів та алгоритмів первинної та вторинної обробки радіолокаційних сигналів у радіолокаційних комплексах дистанційного зондування АПШ. Наведено дані про впровадження результатів роботи, особистий внесок автора та публікації.

**У першому розділі** дисертаційної роботи “**Радіо- і радіоакустичне зондування атмосферного прикордонного шару**” проаналізовані спрямовані на підвищення безпеки зліту і приземлення літаків в аеропорті вимоги автоматизованих систем керування повітряним рухом до оперативності, похибок і просторової області дистанційного вимірювання профілів швидкості вітру і температури в атмосферному прикордонному шарі. Виконано огляд методів і засобів дистанційного вимірювання профілів температури і швидкості вітру радіолокаційним комплексом, що включає радіопрофайлер і радіоакустичну систему, а також методів і алгоритмів первинної та вторинної обробки радіосигналів, що прийняті такими системами. Проаналізовано шляхи підвищення оперативності первинної

обробки прийнятих радіосигналів, що ґрунтуються на удосконаленні методів спектрального аналізу і параметризації вибіркового спектра, а також переваги і недоліки цих методів. Проведено аналіз шляхів розширення просторової області вірогідного визначення профілів швидкості вітру і його напрямку, що базуються на удосконаленні методів вторинної обробки метеоінформації. Висунуто гіпотезу про можливість екстраполяції профілів метеовеличин з використанням теорії прогнозування на базі моделей авторегресії за межі просторової області їх вірогідного визначення радіолокаційною системою. Проаналізовано способи розширення області визначення профілів температури в системі радіоакустичного зондування, на основі виконання умови Бреґга в межах діапазону висот зондування цієї системи шляхом підстроювання частот радіо- чи акустичного передавачів. Показано, що для досягнення виконання умови Бреґга в усьому діапазоні висот визначення температури ефективнішим є спосіб підстроювання частоти радіопередавача. Сформульовані недоліки, притаманні цьому методу, усунення яких вимагає проведення наукових досліджень. Результати теоретичних і експериментальних досліджень, отримані при вирішенні поставлених задач, викладені в другому, третьому і четвертому розділах дисертаційної роботи.

У другому розділі дисертаційної роботи **“Підвищення ефективності обробки радіосигналів, прийнятих РЛС вертикального зондування АПШ і синтез оптимальних алгоритмів обробки цих сигналів”** обґрунтовується вибір методів вирішення задач підвищення оперативності первинної обробки радіосигналів, що прийняті доплерівськими радіопрофайлерами, а також розширення просторової області вірогідного вимірювання профілів швидкості вітру доплерівським радіопрофайлером. Викладаються теоретичні аспекти рішення цих задач. Для підвищення оперативності обробки радіосигналів, прийнятих доплерівськими радіопрофайлерами, вперше запропоновано використовувати для параметризації СЦП комбінації авторегресійного методу з методами моментів та найменших квадратів (НК). Авторегресійний метод використовується тільки для одержання початкових приблизних оцінок перших двох моментів СЦП ( $\Delta f$ ,  $f_d$ ), тому що при реалізації цього метода через малі порядки моделі АР (перший, другий) флуктуаційні похибки вимірювання швидкості вітру і його середньоквадратичних пульсацій вище, ніж у традиційних методів. Уточнення параметрів СЦП, розрахованої за коефіцієнтами моделі АР більш високого порядку, виконується з використанням методів моментів та НК. Істотне зниження часу первинної обробки досягається за рахунок того, що при наявності інформації (одержуваної авторегресійним методом) про доплерівський зсув спектрального максимуму і його ширину потрібно обчислювати і піддавати подальшій параметризації з використанням методів моментів або НК тільки ту сукупність відліків частоти, що відповідає головному максимуму.

Для авторегресійного метода отримані аналітичні вирази, що зв'язують значення другого моменту вибіркової СЦП  $\Delta f$  з вибірковими коефіцієнтами  $\Phi$

моделі AP першого порядку  $\Delta f = -\frac{1}{\pi \cdot T_{\text{вдл}}} \ln \left( -\frac{\Phi_c}{\cos(2 \cdot \pi \cdot f_d \cdot T_{\text{вдл}})} \right)$  і другого порядку

$$\Delta f_1 = -\frac{1}{\pi \cdot T_{\text{вдл}}} \ln \left( \frac{\text{Re}(-\Phi[1] + \sqrt{(\Phi[1])^2 - 4 \cdot \Phi[2]})}{2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{d1} \cdot T_{\text{вдл}})} \right),$$

$$\Delta f_2 = -\frac{1}{\pi \cdot T_{\text{вдл}}} \ln \left( \frac{\text{Re}(-\Phi[1] - \sqrt{(\Phi[1])^2 - 4 \cdot \Phi[2]})}{2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{d2} \cdot T_{\text{вдл}})} \right),$$

де  $T_{\text{вдл}}$  – інтервал між часовими відліками в реалізації вибіркового радіосигналу;  $f_d$  – величина доплерівського зсуву спектрального максимуму в реалізації вибіркового радіосигналу на виході квадратурного детектора доплерівського радіопрофайлера.

Для доказу того, що запропоновані комбіновані методи забезпечують оцінювання швидкості вітру і його середньоквадратичних пульсацій із флуктуаційною похибкою, що не перевищує флуктуаційної похибки при використанні традиційних методів СА і параметризації СЦП, запропоновано виконати імітаційне моделювання і синтезовано алгоритм його проведення. Відповідно до цього алгоритму генерується статистично переконлива сукупність вибірок імітаційних радіосигналів, адекватних прийнятним доплерівським радіопрофайлером. Доплерівський зсув спектрального максимуму  $f_d$  для кожної реалізації задається як випадкова величина з рівномірним законом розподілу в діапазоні можливих значень. Значення середньоквадратичної ширини максимуму  $\Delta f$  фіксовано. Діапазони можливих значень  $f_d$  і  $\Delta f$  визначаються за результатами первинної обробки радіосигналів, що прийняті тропосферними РЛС, поширеними на практиці методами СА і параметризації спектра. У даній роботі використані результати вимірювання тропосферної РЛС ХНУРЕ. До кожної реалізації сигналу додається вибірка адитивного білого шуму тієї ж довжини. Кожна отримана реалізації суміші сигналу із шумом піддається СА з використанням традиційних методів спектрального аналізу (БПФ, періодограмний метод Уелча з різними спектральними вікнами, непараметричне оцінювання на базі моделей AP) і параметризації спектра з використанням методів моментів, найменших квадратів, авторегресійного і запропонованих комбінованих методів. У діапазоні відношень сигнал/завада від 1 до 10 для кожної реалізації з ансамблю розраховуються відносні середньоквадратичні відхилення вибіркових значень перших двох моментів СЦП від тих, що задаються, і за результатами обробки всього ансамблю обчислюються флуктуаційні похибки вибіркових оцінок перших двох моментів СЦП. Для формування квадратурних складових імітаційних радіосигналів, адекватних при-

йнятим доплерівськими радіопрофайлерами, розроблено спосіб формування радіосигналу з одномодовим і двомодовим спектром по заданих параметрах СЩП на базі комплексної моделі АР. Цей спосіб, у порівнянні з альтернативними, дозволяє формувати вибірки квадратурних складових сигналу, оцінки СЩП яких не зміщені внаслідок віконної обробки і згладжені. Отримано аналітичні вирази, що зв'язують задані значення доплерівського зсуву мод і ширину цих мод з комплексними коефіцієнтами моделей АР першого порядку

$$\Phi_c[1] = e^{-\Delta\omega T_{\text{вдл}}/2} \cos \omega_h T_{\text{вдл}},$$

$$\Phi_s[1] = e^{-\Delta\omega T_{\text{вдл}}/2} \sin \omega_h T_{\text{вдл}}. \text{ і другого}$$

$$\Phi_c[1] = A1, \Phi_c[2] = (\Phi_s^2[1] - A2 + A1^2) / 2,$$

$$\Phi_s[2] = (A3 - A1 \cdot (\Phi_s^2[1] - A2 + A1^2)) / \Phi_s[1],$$

$$\Phi_s^6[1] + (3 \cdot A1^2 - 2 \cdot A2) \cdot \Phi_s^4[1] + (A2^2 - 3 \cdot A1^2 \cdot A2 + 3 \cdot A1^4 - 4 \cdot A4 - 4 \cdot A1 \cdot A3) \times \\ \times \Phi_s^2[1] + A1^2 \cdot A2^2 - 2 \cdot A1^4 \cdot A2 + A1^6 + 4 \cdot A1 \cdot A2 \cdot A3 - 4 \cdot A1^3 \cdot A3 + A1^6.$$

$$A1 = (c[1] + c[2] + c[3] + c[4]) / 2, A2 =$$

$$c[1]c[2] + c[1]c[3] + c[1]c[4] + c[3]c[4] + c[2]c[3] + c[2]c[4],$$

$$A3 = c[1]c[2]c[3] + c[1]c[2]c[4] + c[1]c[3]c[4] + c[2]c[3]c[4],$$

$$A4 = c[1]c[2]c[3]c[4].$$

$$c[1,2] = e^{-\Delta\omega_1 T_{\text{вдл}}/2 \pm j\omega_{h1} T_{\text{вдл}}},$$

$$c[3,4] = e^{-\Delta\omega_2 T_{\text{вдл}}/2 \pm j\omega_{h2} T_{\text{вдл}}}.$$

У даному розділі вперше запропоновано використовувати теорію і методи прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування на базі моделей АР для екстраполяції профілів швидкості вітру і його напрямку за межі просторової області вірогідного визначення цих метеовеличин доплерівськими радіопрофайлерами з вірогідністю, що задовольняє вимогам АСКПР. Адекватність застосування моделей АР для розв'язку поставленої задачі визначається наявністю кореляційних зв'язків метеовеличин у межах просторового радіуса їх кореляції. Для оцінки глибини вірогідного прогнозу і його якості запропоновано обчислювати абсолютні і середньоквадратичні відхилення спрогнозованих метеовеличин від їх дійсних значень і співставляти результат обчислення з граничними значеннями, обумовленими вимогами АСКПР до похибок вимірювання. Для одержання кількісних оцінок глибини вірогідного прогнозу та абсолютних відхилень прогнозу від дійсних значень синтезовано алгоритм обробки 10000 експериментальних профілів швидкості вітру і його напрямку з використанням ПЕОМ. Відповідно до цього алгоритму для кожного профіля з ансамблю на основі даних про швидкість вітру і його напрямку в діапазоні висот від 1 до h+т складалися прогнози для попереджень від 1 до m за значеннями прогнозованого параметра на висотах від 1 до h. Далі за результатами обчислення абсолютного і

середньоквадратичного відхилень прогнозу від дійсних значень визначається, чи попадає з заданою вірогідністю значення спрогнозованої метеовеличини в вірогідні межі, визначені на підставі вимог АСКПР. Якщо так, то прогноз вважається вірогідним. За результатами обробки ансамблю реалізацій визначається глибина вірогідного прогнозу, оптимальні для цілей прогнозування порядок моделі АР і метод обчислення спрогнозованих значень метеовеличин.

**У третьому розділі дисертаційної роботи “Апробація удосконалених методів первинної і вторинної обробки радіосигналів, прийнятих РЛС дистанційного зондування АПШ, на імітаційних і реальних радіосигналах”** виконана експериментальна перевірка розроблених комбінованих методів параметризації СЦП із використанням прийнятих доплерівським радіопрофайлером реальних радіосигналів і їх імітаційних моделей. Попередньо доведено, що запропонований спосіб формування квадратурних складових імітаційного сигналу забезпечує генерування вибірок цього сигналу з параметрами СЦП, середньоквадратичні відхилення яких від тих, що задаються, не перевищують припустимих. Для цього згенеровано ансамбль вибірок квадратурних складових імітаційного сигналу розмірністю 10000. Доплерівський зсув спектрального максимуму для кожної реалізації випадковий, а відносні середньоквадратичні значення ширини спектрального максимуму дорівнюють  $\Delta f = (1/128) \cdot f_{\text{доп. max}}, (2/128) \cdot f_{\text{доп. max}}, (3/128) \cdot f_{\text{доп. max}}, (4/128) \cdot f_{\text{доп. max}}$ , де  $f_{\text{доп. max}}$  – максимальне значення доплерівського зсуву прийнятого радіосигналу. Для кожної реалізації сигналу з ансамблю розраховані середньоквадратичні відхилення вибірових значень перших двох моментів СЦП від тих, що задаються, і результати розрахунку зіставлені з припустимими значеннями середньоквадратичних відхилень. З метою доказу адекватності імітаційних сигналів реальним проаналізований ансамбль з 500 сукупностей реалізацій реальних і імітаційних радіосигналів з ідентичними спектральними характеристиками і знайдене середнє по ансамблю значення коефіцієнта кореляції реальних та імітаційних сигналів.

Далі, у результаті імітаційного моделювання, отримані кількісні оцінки флуктуаційних похибок визначення перших двох моментів вибіркової СЦП для випадків, коли спектральна щільність потужності для кожної реалізації радіосигналу з ансамблю розраховується з використанням БПФ, метода Уелча (вікна Ханна, Хеммінга, Блекмана, Трикутне, Гаусса), за коефіцієнтами моделі авторегресії (коефіцієнти знайдені з використанням алгоритмів Берга, коваріаційним, модифікованим коваріаційним, Юла-Уокера), а параметризація СЦП виконана з використанням методів моментів, найменших квадратів, авторегресійного та запропонованих комбінованих методів. Виконано порівняльний аналіз отриманих кількісних оцінок для випадків, коли використовуються традиційні методи первинної обробки і запропоновані комбіновані методи. Експериментальна апробація запропонованих комбінованих методів виконана з використанням 40000 реалізацій квадратурних складових реальних радіосигналів, що прийняті тропосферною РЛС вертикального зондування ХНУРЕ. Спектральна обробка кожної реалізації виконана з використанням БПФ, методу Уелча, авторегресійного аналізу,

параметризація спектра – з використанням методів НК, авторегресійного, комбінованих. По ансамблю реалізацій знайдені середньоквадратичні відхилення оцінок перших двох моментів СЩП, отриманих комбінованими методами, від тих оцінок, які отримані за допомогою поширених на практиці методів.

У третьому розділі також виконана експериментальна перевірка висунутої гіпотези про можливість екстраполяції профілів швидкості вітру і його напрямків за межі просторової області їх вірогідного визначення доплерівськими радіопрофайлерами. На підставі результатів експериментального вимірювання профілів швидкості вітру і його напрямку для кожного профілю з ансамблю в 10000 реалізацій виконана екстраполяція з використанням трьох видів прогнозу з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування на базі моделей АР (за коефіцієнтами різницевого рівняння, за коефіцієнтами імпульсної характеристики фільтра прогнозування, проінтегрована форма). З використанням двох запропонованих критеріїв оцінки якості прогнозу побудовані залежності імовірності влучення спрогнозованої метеовеличини в вірогідні межі прогнозу від висоти, з якої робиться прогноз. Оцінено глибину вірогідного, відповідно до вимог АСКПР, прогнозу, порядок моделі АР, що адекватний до цілей прогнозування. Вибір порядку моделі АР здійснювався з використанням критеріїв мінімуму середньоквадратичного відхилення і максимуму правдоподібності, а перевірка адекватності моделі здійснювалася з використанням сукупного критерію згоди.

У четвертому розділі дисертаційної роботи **“Розширення просторової області визначення профілів температури комплексами вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару”** вирішується задача розширення просторової області вірогідного визначення профілів температури системою радіоакустичного зондування. З метою розв’язання задачі удосконалюються спосіб та алгоритм автопідстроювання радіочастоти випромінювання в системі РАЗ для досягнення виконання умови Брегга  $\lambda_e = 2 \cdot \lambda_s \cdot \cos \psi$  в усьому діапазоні висот зондування, де  $\psi$  – кут між напрямками нормалей до фронтів акустичної та електромагнітної хвилі;  $\lambda_e$  – довжина електромагнітної хвилі, м;  $\lambda_a$  – довжина акустичної хвилі в атмосфері, м. При виконанні цієї умови досягається синфазність підсумовування радіохвиль, відбитих від елементів акустичної решітки, що створена випроміненим акустичним імпульсом, і у результаті підстроювання радіочастоти підвищується відношення сигнал/завада у вибірках прийнятих радіосигналів. Перша відмінність удосконаленого способу підстроювання радіочастоти від тих, що застосовувалися раніше, в тім, що в комплексі системи РАЗ та доплерівського радіопрофайлера інформація про швидкість вітру, що надходить від радіопрофайлера, використовується для визначення величини горизонтального і вертикального зносу акустичного пакета під дією вітру в діапазоні висот зондування системи РАЗ. Цей зсув враховується при подальшому підстроюванні частоти радіопередавача системи РАЗ з метою компенсації порушення умови Брегга, викликаного зносом акустичного пакета. Друга відмінність – підстроювання радіочастоти виконується дискретно для кінцевої сукупності висот за час  $\leq 200$  мкс. В інтервалах часу між підстроюванням,

коли перехідні процеси в петлі автопідстроювання закінчені, здійснюється вимірювання швидкості звуку та обчислення за цими даними температури. Тільки в цьому випадку забезпечується вимога до короткочасної стабільності частоти радіовипромінювання і, отже, до похибок вимірів. Запропонований алгоритм керування радіочастотою випромінювання включає такі дії: а) на підставі результатів попереднього вірогідного вимірювання системою РАЗ і радіопрофайлером відповідно профілів температури і швидкості вітру до висоти  $h_k$  значення радіочастоти випромінювання системи РАЗ, що відповідають виконанню умови Брега в кожному з висотних шарів  $1, 2, \dots, h_k$ , розраховуються за формулою

$$f_{e,i} = \left[ \frac{c_e \cdot f_s}{2 \cdot c(\lambda_e \cdot f_{d,i} / 2 - V_z) \cdot \cos(\psi)} / \Delta f_{\text{шар}} f_s \right] \Delta f_{\text{шар}} f_s, \quad i=1 \dots k, \text{ де}$$

$c_e$  – швидкості електромагнітних хвиль в атмосфері, м/с;  $V_z$  – вертикальна складова швидкості вітру, м/с;  $\Delta f_{\text{шар}} f_s$  – шаг автопідстроювання частоти радіопередачача системи РАЗ;  $[\ ]$  – ціла частина; б) Відповідно до розрахованих значень  $f_{e,i}$  при черговому зондуванні здійснюється керування радіочастотою випромінювання. Для висотних шарів  $h_{k+1} \dots h_{k+m} \dots$  частота радіовипромінювання залишається тією ж самою, як і для шару  $h_k$ . У цьому випадку діапазон вірогідного визначення профілю температури при черговому зондуванні розширюється до висоти  $h_{k+m}$ . Закінченню входження в синхронний режим роботи відповідає момент часу, коли автопідстроювання радіочастоти випромінювання не призводить до подальшого розширення зони вірогідного визначення профілю температури. Далі, у синхронному режимі роботи, мета керування радіочастотою випромінювання – відстеження змін швидкості вітру і температури з часом для підстроювання під умову Брега. Для доказу ефективності роботи удосконаленого способу адаптивного керування радіочастотою випромінювання системи РАЗ виконано імітаційне моделювання роботи цієї системи на базі синтезованого алгоритма. При моделюванні використовувалися наведені в літературних джерелах модель зміни швидкості вітру з висотою, модель лінійної зміни температури з висотою і запропонована Бовшеверовим В.М. модель радіосигналу, прийнятого системою РАЗ. Імітаційне моделювання виконане для системи РАЗ з типовими технічними характеристиками, що працює в умовах слабкого та інтенсивного вітру ( $|V_r|=1$  м/с  $|V_r|=15$  м/с відповідно), при значеннях висотного градієнта температури  $\gamma=1^\circ\text{C}/100\text{м}$  і  $3^\circ\text{C}/100\text{м}$ , коефіцієнтах загасання акустичних хвиль в атмосфері  $\alpha=0.01, 0.05, 0.1$  дБ/м. У результаті моделювання побудовані залежності зміни відношення сигнал/завада у вибірках прийнятого радіосигналу від номера зондування при входженні системи РАЗ у синхронний режим роботи, оцінений ступінь розширення області вірогідного визначення профілів температури для випадків інтенсивного і неінтенсивного вітру, визначені доцільні для практичного застосування діапазон довжин акустичних хвиль і довжини акустичного пакета. Також розрахована величина теоретичного зниження флуктуаційної похибки визначення температури системою РАЗ при використанні запропонованого алгоритма адаптивного керування радіочастотою випромінювання у порівнянні з

випадком, коли підстроювання не застосовується. У четвертому розділі також доводиться можливість практично реалізувати синтезатор радіочастоти випромінювання з адаптивним керуванням; до нього пред'явлені технічні вимоги, обрана елементна база, на якій він може бути практично реалізований, розроблені програми для проведення імітаційного моделювання.

## ВИСНОВКИ

У дисертації запропоноване нове рішення актуальної наукової задачі удосконалення методів і алгоритмів первинної і вторинної обробки радіосигналів у радіолокаційних комплексах вертикального дистанційного зондування атмосферного прикордонного шару шляхом застосування авторегресійних методів обробки прийнятих сигналів у комплексованій системі, яка містить доплерівський радіопрофайлер і радіоакустичну систему, а також шляхом застосування ефективного алгоритму керування радіочастотою системи РАЗ. Це дозволило істотно зменшити час первинної обробки радіосигналів, що прийняті радіолокаційними системами вертикального зондування атмосфери та розширити просторову область вірогідного визначення профілів швидкості вітру і температури.

Основні результати роботи такі:

1. Застосування вперше для параметризації СЩП радіосигналів, що прийняті доплерівським радіопрофайлером, авторегресійного методу в сукупності з методами моментів і найменших квадратів дозволило в 2.5...10 разів скоротити час параметризації спектра й у 1.2...1.7 разів – час обчислення СЩП у порівнянні з традиційними методами. Експериментальна перевірка розроблених комбінованих методів на реалізаціях реальних радіосигналів, отриманих із тропосферної РЛС вертикального зондування ХНУРЕ, та їх імітаційних моделях підтвердила працездатність цих методів, високу надійність, особливо при малих відношеннях сигнал/завада. На підставі результатів імітаційного моделювання доведено, що флуктуаційна похибка визначення першого моменту СЩП при використанні комбінованого методу менша, ніж при використанні методу Уелча в поєднанні з методом НК у 1.1...1.5 рази, а флуктуаційна похибка визначення величини другого моменту СЩП знижується в 1.1...2 рази при застосуванні комбінованих методів. Першорядна вагомість результату – одержання оперативних оцінок 3-х та 10-ти секундних поривів вітру для забезпечення безпеки зліту і приземлення літака, що дає змогу підвищити темп зліту і приземлення літаків у сучасному аеропорті.
2. З метою проведення імітаційного моделювання в дисертаційній роботі розроблено спосіб формування квадратурних складових сигналів із заданими параметрами СЩП, що адекватні складовим сигналу на виході квадратурного детектора доплерівського радіопрофайлера, з використанням комплексної моделі авторегресії. З використанням цієї моделі отримані кількісні оцінки флуктуаційних похибок оцінювання перших двох моментів СЩП традиційними і запропонованими комбінованими методами спектрального аналізу і

параметризації спектра, обрані адекватні характеристикам сигналів порядки моделі авторегресії (6-8) й алгоритми обчислення її коефіцієнтів.

3. Розширено область визначення профілів швидкості вітру і його напрямків у межах просторового радіуса кореляції цих метеовеличин шляхом екстраполяції профілів за межі області достовірного визначення доплерівського радіопрофайлера. Для рішення задачі були застосовані методи прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування на базі моделей авторегресії. Якість прогнозу задовольняє вимоги автоматизованих систем керування повітряним рухом у межах просторового радіуса 58м для проаналізованого типу станції. Адекватні досягненню якісного прогнозу порядки моделі авторегресії становлять 2-3, число відліків у профілі, по яких робиться прогноз – 18 для швидкості вітру і 20 – для його напрямку; алгоритм прогнозування – за коефіцієнтами моделі авторегресії відповідно до різницевого рівняння. Практична цінність результату полягає в розширенні просторової області визначення метеовеличин доплерівським радіопрофайлером без збільшення енергетичного потенціалу системи.
4. Запропоновано удосконалений алгоритм адаптивного керування частотою радіопередавача системи РАЗ. На відміну від попередніх методик в удосконаленому алгоритмі при підстроюванні радіочастоти враховується знесення акустичного пакета під дією вітру та порушення умови Брегга, завдяки використанню інформації про профіль швидкості вітру, що надходить від радіопрофайлера, а також забезпечується необхідна відносна короткочасна нестабільність частоти радіопередавача системи РАЗ  $10^{-10}$  за час 0.17 с. Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості збільшення просторової області визначення температури системою РАЗ у 1.2...2.5 разів при відношеннях сигнал/завада 1...1000 і загасаннях акустичних хвиль в атмосфері 0.01...0.05 дБ/м. Теоретично доведено, що за рахунок підвищення відношення сигнал/завада у вибірках прийнятих радіосигналів похибки вимірювання температури можна зменшити на 5...20% у порівнянні з випадком, коли автопідстроювання відсутнє, та на 3...15% у порівнянні з традиційним алгоритмом в умовах інтенсивного вітру ( $V_f=15$  м/с), коли при автопідстроюванні не враховується горизонтальний знос акустичного пакету під дією вітру. Сформульовано вимоги до технічних характеристик синтезатора радіочастоти, вибору акустичної частоти і тривалості акустичного імпульсу.

У цілому мета наукових досліджень, сформульована в дисертаційній роботі, досягнута шляхом удосконалення методів первинної і вторинної обробки радіосигналів у комплексах вертикального радіолокаційного зондування атмосфери. Запропоноване рішення поставленої актуальної задачі потребує мінімальних витрат економічних ресурсів, що особливо актуально для створення АСКПР України й узгоджується з загальними світовими тенденціями удосконалення засобів дистанційного зондування атмосферного прикордонного шару та зниження їх собівартості .

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Зубков О.В. Повышение эффективности обработки информации в атмосферных РЛС вертикального зондирования //Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. Сб. – 2003. – Вып. 131. – С. 21-26
2. Зубков О.В. Расширение области определения профилей температуры атмосферного пограничного слоя системами радиоакустического зондирования К.: Вести высших учебных заведений “Радиоэлектроника”. – 2003. – Т. 46, №7. – С. 18-27.
3. Тихонов В.А., Зубков О.В., Сидоров Г.И. Генерирование квадратурных составляющих случайного узкополосного аналитического сигнала на несущей частоте по заданным параметрам спектральной плотности мощности //АСУ и приборы автоматики: Всеукр. межвед. науч.-техн. Сб. – 2003. Вып. 124. С. 18-22
4. Зубков О.В., Олейников В.М. Определение скорости ветра и оценка турбулентности атмосферы методами спектрального анализа в атмосферных РЛС вертикального зондирования //Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. Сб. – 2002. – Вып. 127. – С. 36-41
5. Зубков О.В., Величко Д.А., Сидоров Г.И. Расширение зоны определения высотных профилей скорости ветра в наземных радиолокационных системах дистанционного зондирования атмосферы //Радиоэлектроника и информатика: Всеукр. межвед. науч.-техн. журнал – 2003. – №2. – С. 18-22
6. Зубков О.В. Расширение зоны определения высотных профилей скорости ветра в наземных радиопрофилерах ясного неба //Материалы 7-го международного молодежного форума “Радиоэлектроника и молодежь в XXI столетии”. – Харьков: ХНУРЭ. – 2003. С. 29.
7. Зубков О.В. Применение синтезатора радиочастоты в системах радиоакустического зондирования атмосферного пограничного слоя //Тезисы докладов Международной научной конференции “Теория и техника передачи, приема и обработки информации”. – Туапсе. – 2003. С.93-94

**АНОТАЦІЇ**

**Зубков О.В. Розширення зони огляду і поліпшення технічних характеристик комплексу вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2004.

Дисертацію присвячено підвищенню оперативності вимірювання профілів швидкості вітру і температури, а також розширенню просторової області їх вірогідного визначення комплексами вертикального радіолокаційного зондування атмосферного прикордонного шару, які містять доплерівський радіопрофайлер і

радіоакустичну систему. Для підвищення оперативності вимірювання розроблено комбіновані методи параметризації спектра, що дозволило істотно скоротити час первинної обробки прийнятих радіосигналів. Вперше застосовано методи прогнозування з мінімальною середньоквадратичною похибкою прогнозування на базі моделей авторегресії для екстраполяції профілів метеовеличин за межі просторової області їх вірогідного визначення доплерівським радіопрофайлером з якістю, що задовольняє вимоги автоматизованих систем керування повітряним рухом. Вдосконалено алгоритм адаптивного керування частотою радіопередавача системи радіоакустичного зондування (РАЗ), у якому передбачена компенсація впливу зносу акустичного пакета горизонтальним вітром, що забезпечує точне виконання умови Брегга. Забезпечено вимоги до короткочасної нестабільності частоти передавача. Як результат, пропонуються удосконалені алгоритми обробки сигналів у радіолокаційному комплексі вертикального зондування, керування радіочастотою в радіоакустичній системі, а також перелік технічних вимог до синтезатора радіочастоти системи РАЗ. Удосконалені алгоритми апробовані з використанням результатів натурального вимірювання та імітаційного моделювання.

*Ключові слова: доплерівський радіопрофайлер, радіоакустична система, параметризація спектральної щільності потужності, перший та другий моменти спектральної щільності потужності, авторегресія, прогнозування.*

**Зубков О.В. Расширение зоны обзора и улучшение технических характеристик комплекса вертикального радиолокационного зондирования атмосферного пограничного слоя.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2004.

Диссертационная работа посвящена повышению оперативности измерений профилей скорости ветра и температуры, а также расширению пространственной области их достоверного определения комплексами вертикального радиолокационного зондирования атмосферного пограничного слоя, включающими доплеровский радиопрофайлер и радиоакустическую систему. Для повышения оперативности измерений разработаны комбинированные методы параметризации спектра, что позволило существенно сократить время первичной обработки принимаемых радиосигналов. Впервые применены методы прогнозирования с минимальной среднеквадратической ошибкой предсказания на базе моделей авторегрессии для экстраполяции профилей метеовеличин за пределы пространственной области их достоверного измерения доплеровским радиопрофайлером с качеством, удовлетворяющим требованиям автоматизированных систем управления воздушным движением. Усовершенствован алгоритм адаптивного управления частотой радиопередатчика системы радиоакустического зондирования (РАЗ), в котором предусмотрена компенсация влияния сноса акустического пакета ветром, что обеспечивает точное выполнение условия Брегга. Обеспечены требования к кратковременной нестабильности частоты передатчика. Как ре-

зультат, предлагаются усовершенствованные алгоритмы обработки сигналов в радиолокационном комплексе вертикального зондирования и управления радиочастотой в радиоакустической системе, а также перечень технических требований к синтезатору радиочастоты системы РАЗ. Усовершенствованные алгоритмы апробированы с использованием результатов измерений и на имитационных моделях.

*Ключевые слова: доплеровский радиопрофайлер, радиоакустическая система, параметризация спектральной плотности мощности, первый и второй моменты спектральной плотности мощности, авторегрессия, прогнозирование.*

**Zubkov O.V. The gap filling and performance buildup of a system of vertical radar sounding of an atmospheric boundary layer. - Manuscript.**

Thesis for the candidate's degree by speciality 05.12.17 - radio engineering and television systems. - Kharkov national university of radio electronics, Kharkov, 2004.

Ph.D. thesis is consecrate to a enhancement of efficiency of measurements of profiles of a wind velocity and temperature, and extension of reliable determination area at a space by systems of vertical radar sounding of an atmospheric boundary layer. This system includes Doppler radio profiler and radioacoustic sounding system. The methods and algorithms of preprocessing and reprocessing of receive radio signals in a system of vertical radar sounding are improved for achievement of problem solution. Combined methods of a parametrization of a sample spectrum - combination of a autoregressive method with methods of moment and root least-squares method for the first time are developed. It was allowed to reduce a time of an estimation of sample values of the first two moment of a power spectral density of radio signals receive by Doppler radio profiler (2.5 ... 10 times less) and reduce a time required for the spectral analysis (1.2 ... 1.7 times less). The effectiveness of offered combined methods is proved based on comparative analysis of processing results by the offered methods of ensembles of realizations of actual radio signals and theirs simulation models and by the traditional methods.

Methods of forecasting with minimum mean-square error of a prediction on basis of models of an autoregression for an extrapolation of profiles with minimum mean-square error are used. For a proof of applicability of methods of forecasting to a solution of a posed problem the algorithm of reprocessing of an ensemble of the measured profiles is synthesized and the processing of these realizations is done.

The root mean-square errors of a prediction of a velocity of a wind and its direction do not exceed legitimate values, which magnitude is determined by the requirements to an error of measurements of automated control systems of air traffic. The optimum orders of the ARE model, minimum number of samples in a profile are defined for reliable prognose. The depth of the reliable prediction is defined also. The algorithm of adaptive control of the radiotransmitter frequency of a radioacoustic sounding system is improved. The tuning of frequency in synthesized algorithm is provide for a compensating of influence of a drift of an acoustic package by a horizontal wind, that ensures exact realization of a Bregg condition. The requirements to short-term instability

of frequency of the transmitter  $10^{-10}$  are assured. The simulation of a radioacoustic system work with the improved frequency control algorithm is done. The extent of the possible extension of a temperature profiles measurement range and reduction of a fluctuation error of measurements is theoretically estimated by using of the offered improved algorithm.

As an result, the improved algorithms of processing of signals in the system of vertical radar sounding and the control of radio-frequency of a radioacoustic sounding system are offered, and it includes a list of specifications to the synthesizer of a radio-frequency with adaptive radio frequency tuning for the RASS system.

***Key words: Doppler radio profiler, radioacoustic sounding system, parametrization of a power spectral density, first and second moment of a power spectral density, autoregression, forecast.***