

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

Лю Чан



УДК 621.396.933.21

**УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ
РАДІОАКУСТИЧНОГО І АКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ
АТМОСФЕРНОГО ГРАНИЧНОГО ШАРУ**

Спеціальність 05.12.17 – радіотехнічні і телевізійні системи

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Сліпченко Миколай Іванович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді
та спорту України,
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Карташов Володимир Іванович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді
та спорту України,
завідувач кафедри радіотехнічних систем;

доктор фізико-математичних наук, професор
Рогожкін Євген Васильович,
Харківський національний політехнічний університет
„ХПІ” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту
України,
професор кафедри „Радіоелектроніка”,
Лауреат премії Ради Міністрів СРСР 1989 р.

Захист відбудеться «25» грудня 2012р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14, ауд. 13.

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

Автореферат розісланий «23» листопада 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Серед проблем, що стоять перед людством на сучасному етапі, на перший план виходять проблеми збереження середовища існування. До задач, які безпосередньо необхідні для вирішення цих проблем, відносяться створення методів і засобів контролю усіх складових оточуючого середовища, а також теоретичних описів, які дозволяють складати достовірні прогнози.

Однією з найбільш значущих для людства природних систем є атмосферний шар Землі. Найбільш важлива нижня частина тропосфери – атмосферний граничний шар (АГШ), в якому безпосередньо проходить життєдіяльність людини, і такі галузі, як авіація, морський транспорт, екологія, захист навколишнього середовища, особливо поблизу хімічних комбінатів, АЕС та інших потенційно небезпечних об'єктів, які потребують не тільки даних про поточну локальну метеоситуацію, але і достовірного прогнозу. Не менш важливим є визначення локальних метеоумов і для сільського господарства, особливо для сучасних технологій «точного землеробства».

Наукові спостереження за станом АГШ поводяться протягом багатьох століть. Але, незважаючи на тривалу історію експериментальних досліджень і значні зусилля багатьох видатних вчених, які створювали теоретичні моделі, ще й досі не створено точних, адекватних описів динаміки повітряних потоків. За фізичною природою АГШ є найбільш складною частиною атмосфери. В ньому рух повітря визначається межею – поверхнею Землі, і ускладнюється її нерівностями, температурною неоднорідністю потоку в умовах гравітаційного поля. Тому контроль параметрів АГШ потребує створення комплексних інформаційно-вимірювальних систем, які постачають інформацію в режимі on-line.

Контактні метеодавачі не дозволяють розв'язати усі задачі контролю АГШ. Значні розміри АГШ потребують засобів доставки: випускних шарів-зондів, безпілотних літальних апаратів, метеомачт. Альтернативою можуть бути системи дистанційного зондування.

Серед сучасних методів дистанційного зондування значну ефективність показали методи, які ґрунтуються на використанні акустичних хвиль – акустичне та радіоакустичне зондування. Акустичне зондування (АЗ) використовує акустичні хвилі (АХ) аналогічно використанню електромагнітних хвиль (ЕМХ) в активній радіолокації. Інформацію переносить поле АХ, що відбите від неоднорідностей повітряного середовища в АГШ. При радіоакустичному зондуванні (РАЗ) зондуючі посилка АХ сприймає зміни параметрів АГШ, потім неоднорідності діелектричної проникливості повітря, що утворились при проходженні АХ опромінюють полем ЕМХ, а інформацію отримують з прийнятого радіосигналу.

У порівнянні з методами, що базуються на використанні ЕМХ, акустичні методи мають значні переваги завдяки високій чутливості звукових хвиль щодо змін стану повітряної маси. Це підтверджують результати більш ніж 60-річного періоду розвитку цих методів і не спадаючий інтерес до них – регулярно проводяться великі міжнародні конференції (<http://www.isars.com/>). До переваг методів відносяться можливість забезпечення високої роздільної здатності, екологічна чистота, доступність апаратури, до недоліків – малий рівень сигналів, що приймаються.

Однак, найбільш суттєві недоліки акустичних методів обумовлені складністю виділення інформації в прийнятому сигналі. Засновані на використанні параметрів полів АХ і ЕМХ, методи РАЗ і АЗ, так як і інші методи дистанційних вимірювань, надають лише непряму інформацію. Окрім того, теорія поширення повздовжніх хвиль у неоднорідному рухомому середовищі значно складніша, ніж поперечних, і в багатьох аспектах ще не завершена. Тому проблеми виділення інформації при АЗ і РАЗ стоять більш гостро, ніж у інших методів дистанційного зондування. Вони обумовлені, як складністю розв'язання теоретичних задач, так і використанням традиційних уявлень і шляхів при створенні методик зондування і обробки даних. Сучасний рівень розвитку теоретичних основ динаміки щільного середовища не надає можливості отримання всеохоплюючих рішень, однак він допускає покращання рішень багатьох окремих задач, що складають основу методів РАЗ і АЗ. Для цього потрібен детальний аналіз уявлень, що використовуються. Наразі, це відноситься до припущень бездивергентної турбулентності, прямого переносу методів опису поперечних хвиль на опис повздовжніх, пошуку шляхів розв'язку дифракційної задачі метода РАЗ. Комплексне використання результатів, отриманих під час розв'язання цих задач, підвищить інформативність методів дистанційного зондування АГШ.

Таким чином, є актуальною тема дисертаційних досліджень направлених на пошук нових методів розв'язку задач пов'язаних з виділенням інформації при РАЗ і АЗ, та удосконалення відомих методик обробки сигналів.

Зв'язок роботи с науковими програмами, планами, темами:

Спрямованість дисертаційних досліджень відповідає роботам з виконання відкритих планових НДР, що проводяться у Харківському національному університеті радіоелектроніки (номери держреєстрації 0110U000459, 0112U000207).

Метою роботи є розвиток теоретичних моделей розсіяння акустичних хвиль в неоднорідному потоці АГШ при АЗ і відбиття електромагнітних хвиль на неоднорідностях діелектричної проникливості повітря, що створюються зондуючою посилкою АХ, в бістатичних системах РАЗ задля підвищення інформативності дистанційних акустичних методів зондування

АГШ та удосконалення систем радіоакустичного й акустичного зондування атмосфери.

Основні задачі, розв'язання яких потрібно для досягнення поставленої мети:

1. Визначення впливу факторів, що формують відбитий сигнал АЗ за відсутності зовнішніх джерел тепла, умов створення математичної моделі та оцінка рівня сигналу.

2. Побудова фізичної моделі формування доплерівського зсуву частоти відбитого акустичного сигналу у неоднорідному потоці АГШ, що рухається, доказ необхідності урахування впливу поперечних зсувів середовища на усій трасі руху зондуючої посилки при АЗ, а також діаграм спрямованості антен.

3. Отримання аналітичного виразу для спектра сигналу АЗ при стійкому АГШ і аналіз амплітудно-фазових співвідношень при вертикальному зондуванні.

4. Отримання аналітичного виразу та численний аналіз параметрів прийнятого сигналу на нижній частині траси бістатичних систем РАЗ задля корекції первинних даних при дистанційних метеовимірюваннях.

Об'єкт досліджень: хвильові процеси взаємодії акустичних хвиль з неоднорідним рухомих середовищем, і розсіяння спрямованих пучків електромагнітних хвиль на штучному відбивачі, що створюється неоднорідностями повітря при проходженні спрямованого акустичного випромінювання.

Предмет досліджень: фізичні та математичні моделі методів РАЗ і АЗ з урахуванням реальних технічних можливостей систем дистанційного зондування.

Методи досліджень. Теоретичні основи динаміки неоднорідного рухомого середовища, сучасні теорії турбулентності та динаміки АГШ, теорія розповсюдження акустичних хвиль у випадково-неоднорідному середовищі, теорія антен, теорія дифракції і розсіяння радіохвиль на об'єктах складної форми, методи чисельного моделювання, імітаційне моделювання на ПЕОМ

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Вперше доказано необхідність урахування адиабатичної зміни щільності середовища при оцінюванні загального рівня прийнятого сигналу при АЗ турбулентного АГШ, що на відміну від традиційних уявлень дозволяє урахувати динамічні фактори й оцінити рівень відбитого сигналу за відсутності джерел (стоків) тепла.

2. Вперше доведено, що при оцінюванні флуктуацій доплерівського зсуву частоти прийнятого сигналу при АЗ необхідно розв'язувати задачу у просторі трьох вимірів, ураховувати ДС антени содару і поперечні флуктуації руху повітря на трасі розповсюдження, відмінною особливістю якого є виключення евристичного перенесення властивостей поперечних

хвиль на властивості повздовжніх в ході розробки методик содарного вимірювання швидкості вітру.

3. Отримано вираз для спектра прийнятого сигналу при АЗ, що на відміну від відомих враховує фізичні особливості стійкого стану АГШ і дозволяє розв'язати пряму задачу визначення температурних градієнтів, а також зробити висновок про використання модульованих зондуючих посилок для підвищення рівня прийнятих сигналів.

4. Вперше розв'язано дифракційну задачу відбиття електромагнітних хвиль від неоднорідностей діелектричної проникливості повітря, які виникають під час проходження зондуючого пакета акустичних хвиль на нижній частині траси зондування бістатичних систем РАЗ, що на відміну від відомих дозволяє обчислити функції корекції первинних даних при дистанційних метеовимірюваннях, які виключають причини методичних похибок вимірювань метеопараметрів на цій частині траси зондування.

Практична значущість отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Результати аналізу інтенсивності розсіяння акустичних хвиль при розвиненій турбулентності та відсутності джерел (стоків) тепла в АГШ дозволяють оцінити рівень прийнятого сигналу, що є підґрунтям для розв'язку обернених задач визначення енергії турбулентних пульсацій і дифузії домішок.

2. Обґрунтування фізичних процесів формування доплерівського зсуву частоти прийнятих сигналів АЗ у турбулентному АГШ дозволяє уточнити методики визначення величини флуктуацій та похибки середньої швидкості повітряних потоків при нестійкому стані АГШ, сформулювати вимоги щодо антен содарів з урахуванням необхідності збільшення об'єму отриманої інформації про параметри турбулентних вихорів.

3. Результати аналізу руху акустичної послилки при стійкій стратифікації АГШ є підґрунтям для створення методики вимірювань швидкості ламінарних потоків, а також обґрунтовують необхідність включення фазометрів у схеми приймальних пристроїв содарів..

4. Усунено причини методичної похибки метеовимірювань на нижній частині траси зондування бістатичними системами РАЗ, що дозволяє співвідносити висотні метеодані з даними контактних приземних метеодавачів.

5. Обґрунтовано вимоги щодо конструкцій антенних пристроїв бістатичних систем РАЗ.

Матеріали дисертаційних досліджень використано при виконанні відкритої держбюджетної теми №249-3 у Харківському національному університеті радіоелектроніки (номер держреєстрації 0110U000459).

Обґрунтованість і достовірність отриманих у роботі результатів підтверджено відповідністю оцінок, отриманих за допомогою чисельних і аналітичних моделей, відомих результатам спостережень, а також відповідністю асимптотам і окремим випадкам, які мають точні математичні подання.

Особистий вклад здобувача. Особистим результатом автора є послідовне проведення комплексного дослідження, що включає аналіз сучасних моделей акустичного та радіоакустичного методів зондування АГШ, основних типів і конструкцій сучасних систем АЗ і РАЗ, відомих результатів метеодосліджень, розробку та доведення алгоритмів і програм розв'язку задач, а також обґрунтування отриманих теоретичних і чисельних результатів. З робіт у співавторстві винесено лише результати, в отриманні яких автор приймав безпосередню участь.

Апробація результатів роботи.

Основні результати роботи, викладені в дисертації, доповідалися і обговорювалися на п'яти міжнародних конференціях і двох міжнародних симпозиумах: 21-й Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» Севастополь, 12-16 вересня 2011; 22-й Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» Севастополь, 10-14 вересня 2012, International Conference on Antenna Theory and Techniques, 20-23 September, 2011, Kyiv, Ukraine «ICATT'11», IV-ому Міжнародному Радіоелектронному Форумі “Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку“, VII-й регіональній студентській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Молодежь и глобальные проблемы современности» Москва, 2012, ISARS-2012 Boulder, Colorado, 4-7 June 2012 Proceedings of the 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing, V-й Ювілейній Міжнародній науковій конференції «Функціональна база наноелектроніки» Кацівелі, 2-5 жовтня 2012.

Публікації за темою дисертації.

За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 5 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, а також 7 доповідей у збірниках матеріалів наукових міжнародних конференцій і симпозиумів.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (148 найменувань) і трьох додатків. Загальний об'єм роботи – 171 с. (з них основний текст – 133 с., 49 малюнків, 1 таблиця).

У вступі виділено найбільш актуальні задачі, які є на сучасному етапі розвитку методів дистанційного зондування АГШ, що базуються на використанні АХ, сформульовано направленість досліджень, обґрунтовано актуальність теми дисертації, практичну значущість і наукову новизну, подано структуру роботи і стисло викладено зміст її розділів.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел. Стисло викладено сучасний стан і загальні проблеми теоретичних основ фізики атмосфери й атмосферного граничного шару. Дано оцінку основних особливостей прогнозу локальної метеорологічної обстановки і засобів для

його інформаційного забезпечення. Показано необхідність використання дистанційних методів зондування АГШ, зазначено переваги методів РАЗ і АЗ. Особливу увагу приділено задачам розвитку систем контролю і прогнозу локальної метеообстановки для забезпечення технологій «точного землеробства».

Детально розглянуто сучасний стан методів і засобів АЗ – содарів (акустичних локаторів, SODAR – SOnic Detection And Ranging), і систем РАЗ, (RASS – Radio Acoustic Sounding System).

За більш ніж піввіковий період розвитку в цьому напрямку накопичено значний досвід, як в теорії, так і в практиці реалізації цих методів. Однак до сьогодні системи РАЗ і АЗ не стали в один ряд з такими засобами, як контактні термометри, гігromетри або анемометри. Це викликано непрямим характером вимірювань та значною складністю фізичних процесів, яка обумовлює недоліки теоретичних описів. Показано, що розробка методик зондування, створення конструкцій систем РАЗ і АЗ значною мірою базується на суб'єктивних уявленнях і евристичних підходах, які не завжди адекватні дійсності. Наприклад, це відноситься до уявлень бездивергентної турбулентності, використання формул радіолокації при описі прийнятого сигналу в системах РАЗ та ін.

При формулюванні конкретних задач дисертаційної роботи попередньо детально проаналізовано історію виникнення, сучасний стан, теоретичні та практичні можливості того або іншого відомого зараз рішення. Враховано особливості відомих реальних систем АЗ і РАЗ й перспективи удосконалення їх конструкцій, а також надбання, накопичені в наукових підрозділах Харківського національного університету радіоелектроніки.

У результаті проведеного аналізу виділено задачі, що є актуальними для розвитку методів акустичного зондування АГШ, для яких сучасні теоретичні уявлення дозволяють отримати якісно нові рішення.

Першою сформульовано задачу уточнення механізмів відбиття АХ у турбулентному потоці за відсутності зовнішніх джерел тепла.

Другою задачею є створення фізичних моделей формування інформаційних параметрів прийнятих сигналів при содарних вимірюваннях швидкості вітру за різних станів АГШ.

Третьою задачею, що направлена на підвищення ефективності методу АЗ, є оцінка параметрів інформаційних компонент у спектрі прийнятого сигналу при зондуванні стійкого АГШ. (інформативних показників спектру прийнятого)

Четвертою задачею даної роботи є створення математичної моделі дифракції ЕМХ на неоднорідностях діелектричної проникливості повітря, що утворилися під час проходження АХ на нижній частині траси зондування бістатичними системами РАЗ.

Другий розділ присвячено розв'язку фізичних задач, необхідних для удосконалення методик зондування, виділення метеоінформації та розвитку засобів АЗ.

На початку розділу проведено детальне обґрунтування шляхів розв'язку перших трьох з поставлених вище задач, завдяки чому зменшено вірогідність пропуску суттєвих факторів, або внесенню суб'єктивних уявлень. При цьому послідовно виділено особливості складання вихідних рівнянь гідродинаміки, акустики неоднорідного рухомого середовища, сучасних уявлень про динаміку АГШ, розглянуто зроблені спрощення та їх обґрунтованість при формулюванні задач АЗ. Особливу увагу приділено питанням розсіяння звукових хвиль у турбулентному потоці. На підставі цього аналізу подано оцінки внесків варіацій вітру, температури, пульсацій тиску при адіабатичному русі основного потоку в процес розсіяння АХ.

Першою розв'язаною задачею даного розділу є задача визначення внеску пульсацій руху середовища в турбулентному потоці за відсутності джерел (стоків) тепла на поверхні, що є межею потоку.

Сучасні теорії описують взаємозв'язки поля швидкостей турбулентного потоку на підставі нестисливості середовища ($\text{div } \vec{v} = 0$). Таке уявлення використовується і під час аналізу розсіяння звуку. Однак, для того, щоб частинка потоку змінювала свою швидкість, необхідно поле сил, яким у турбулентному АГШ може бути лише поле градієнта тиску – $\text{grad } p$. Зв'язок флуктуацій тиску та щільності в турбулентному потоці повітря при заданих флуктуаціях швидкості встановлюється на підставі реологічного рівняння $\text{grad } p = \rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right]$, і рівняння адіабати

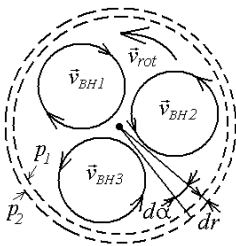


Рисунок 1 – До визначення $\text{grad } p$ у турбулентному потоці

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma .$$

Таким чином, за відсутності зовнішніх джерел (стоків) тепла в турбулентному потоці маємо адіабатичну зміну щільності $\Delta \rho_v$. Оцінку $\Delta \rho_v$ проведено для розмірів і швидкостей вихорів, які характерні для нестійкого стану АГШ, з використанням фізичних уявлень визначення доцентрових сил (рис.1).

При підстановці чисельних значень, які відповідають метеоумовам середніх широт для змін щільності і тиску під дією

$$\text{температури та флуктуацій вітру отримано: } \left| \frac{\Delta \rho_T}{\rho_0} \right| \approx 10^{-4} \text{ і } \left| \frac{\Delta \rho_v}{\rho_0} \right| = 2 \cdot 10^{-6} .$$

Тому рівень відбитого поля від $\Delta \rho_v$ буде достатнім для впевненої

реєстрації прийнятого сигналу. У дисертації це підтверджено зразками сигналів, що отримано раніше у проблемній науково-дослідницькій лабораторії Харківського інституту радіоелектроніки (ПНДІ ЗА ХІРЕ).

Під час розв'язку *другої* задачі – створення фізичних моделей формування інформаційних параметрів при содарному вимірювання швидкості вітру, використано фізичні уявлення про перенесення поля АХ основним потоком (рис.2).

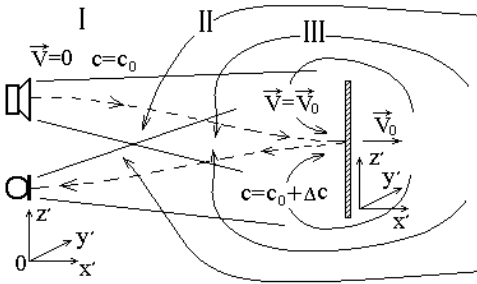


Рисунок 2 – Схема руху повздовжніх хвиль і середовища при русі відбивача

вимірювання необхідно для оцінювання флуктуацій $\Delta \bar{v}$, і енергії турбулентності. Однак такий підхід призводить до значної дисперсії розрахованого значення середньої швидкості і значних різниць $\Delta \bar{v}$ від істинного значення. Наприклад, з урахуванням розмірів турбулентних вихорів згідно з «законом 2/3» Колмогорова-Обухова, та звичайними кутами нахилів акустичних променів, кореляція компонент вектора швидкості в точках вимірювань f_d близька до мінімальної.

Окрім того, якщо у поперечних хвиль (ЕМХ) виникнення Δf_d визначається безпосередньо флуктуаціями руху відбивача, то у повздовжніх хвиль, які розповсюджуються в середовищі, що рухається разом з відбивачем, зсув частоти f_d і його флуктуацій Δf_d формується в області II (рис.2) завдяки деформації середовища на трасі розповсюдження АХ. Ламінарний шар поблизу відбивача (область III) рухається разом з ним, тому відбиття хвиль підкорено законом для нерухомого середовища. Аналогічно для перешкод, які сформувалися в неоднорідному потоці – температурних або вітрових. Таким чином, у формуванні Δf_d приймають участь поперечні зсуви середовища вздовж усієї трасі розповсюдження АХ (область II), а значення Δf_d залежить від діаграм спрямованості (ДС) антен.

Зараз швидкість вітру \bar{v} вимірюють похилим трипроменевим зондуванням. Як первинна інформація використовується доплерівський зсув частоти прийнятого сигналу f_d в кожному промені. При турбулентному стані АГШ вихідне значення f_d має флуктуаційну компоненту – Δf_d . Її

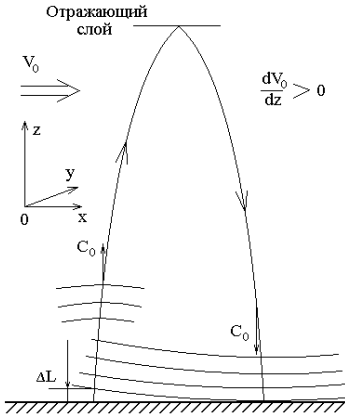


Рисунок 3 – Траекторія акустичного променя при вертикальному АЗ

При стійкому стані АГШ вимірювання швидкості вітру похилим зондуванням має наступні особливості. При вертикальному зондуванні сумарна швидкість руху звукової посилки – c у вертикальному напрямку визначається швидкістю звуку c_0 , у горизонтальному – швидкістю переносу v_0 . При $v_0 = const$ сумарна швидкість c постійна (рис.3). Тому сумарний зсув $f_d = 0$. Така ж ситуація буде і при похилому зондуванні і при рознесених антенах, що працюють на прийом і на випромінювання. Однак горизонтальний зсув посилки обумовлює поточну зміну фази. Фазовий зсув $\Delta\varphi$, який відповідає ΔL , дорівнює:

$$\Delta\varphi(t) = k_s \Delta L(t) = k_s (c_0 t)^{-1} \int_0^{0,5t} V_0(c_0 t') dt' . \quad (1)$$

Це дозволяє визначити \bar{v}_0 при рознесеному прийомі і при обмеженій базі. Тому схема обробки сигналів содару має включати фазометри.

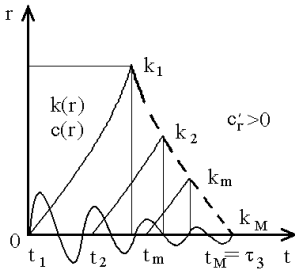


Рисунок 4 – Сумування відбитого поля

Розв'язок *третьої* задачі дозволив отримати вираз для спектра відбитого сигналу при АЗ стійкого АГШ.

У стійкому АГШ коефіцієнт відбиття залежить від змін температури (dT/dz). Схему формування відбитого сигналу показано на рис.4.

Інтегрування відбитого поля по радіусу в області, що зайнята зондуючим пакетом, зручно провести з переходом до часових змінних згідно $t = r / c_0$. Це дає такий вираз:

$$u(\tau_3) = \frac{c_0}{8T_0} \int_0^{\tau_3} U(t') \cdot \frac{dT}{dz} (0,5c_0(\tau_3 - t')) dt' , (2)$$

де $U(t)$ – зондуючий сигнал, τ_3 – час його існування.

При малих значеннях τ_3 в області, що зайнята зондуємим пакетом $\frac{dT}{dz} \approx const$, тому, згідно (2), для підвищення рівня прийнятого сигналу,

зондування стійких шарів необхідно проводити модульованими послідовностями.

Вираз для спектральних компонент прийнятого сигналу має вигляд

$$S_m = \frac{c_0}{16\pi T_0} \int_0^{\tau_3} U(t) \int_0^{\tau_{\max}} T'_z(0,5c_0(t_n - t)) \cdot \exp(i0,5\Omega_1 m t_n) dt_n dt, \quad (3)$$

де $\Omega_1 = 2\pi(\tau_{\max})^{-1}$, τ_{\max} – час існування прийнятого сигналу.

При коротких зондуємих імпульсах інформаційна частина спектра відповідає просторовому спектру температурних змін. На основі зворотного перетворення S_m можливі постановки задач визначення температурних градієнтів у стійких шарах АГШ.

Таким чином, у даному розділі наведено розв'язок задач, які дозволяють підвищити інформативність методу АЗ. Розроблено основи для створення нових методик виділення метеоінформації, зазначено шляхи удосконалення апаратури АЗ, а також обґрунтовано можливості подальшого уточнення цих рішень на підставі сучасних теорій динаміки щільного середовища.

Третій розділ присвячено розв'язку задачі дифракції ЕМХ на неоднорідностях діелектричної проникливості повітря, які утворилися під час проходження АХ у нижній частині траси зондування бістатичних систем РАЗ.

Основними інформаційними параметрами при РАЗ є амплітуда прийнятого сигналу $|u_{\text{вих}}|$ і доплерівський зсув його частоти f_d . Їх зв'язок з метеопараметрами визначається на підґрунті розв'язку дифракційної задачі.

Для постановки вимог щодо дифракційної задачі визначено фізичні, математичні та технічні умови її розв'язку. Показано, що в основі властивостей сигналу, який приймається при РАЗ, покладено: а) фізика відбитого поля, яке сфокусовано рухомим сферичним дзеркалом, що створено пакетом АХ, б) береговська дифракція ЕМХ на періодичній структурі пакета.

Для розв'язку дифракційної задачі в моностатичній зоні можна використати відомі співвідношення для дальньої зони антен, не враховувати різницю оптичного ходу променів, які з'єднують різні частини апертур радіоантен і точок відбиття. Також можна вважати, що умови Бреґга (співвідношення довжини ЕМХ і АХ: $\lambda_e = 2\lambda_a$) в усьому об'ємі зондуємого пакету виконується однаково, а при $r_{e0} \approx 2r_{a0}$ основні потоки потужності (ОПП) випромінювання усіх антен співпадають (рис.5 а). Внизу, де особливо важливо співставляти дані РАЗ з даними метеодавачів, які знаходяться на поверхні Землі або на невисоких метеовежах, отриманий

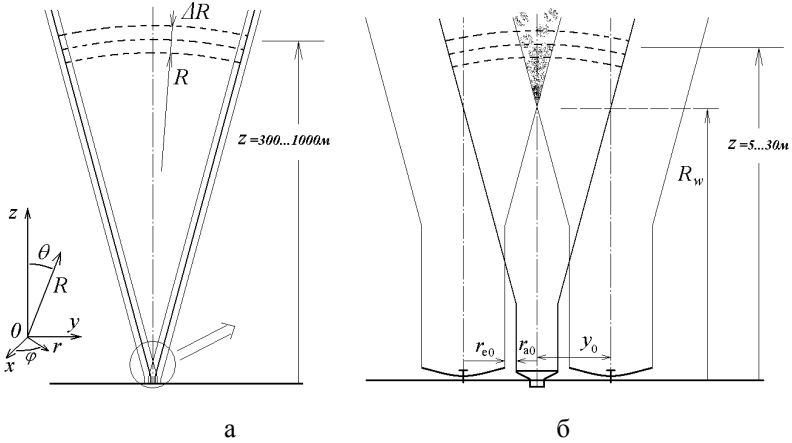


Рисунок 5 – Співвідношення розмірів зон моностатичного (а) і бістатичного (б) наближень

зсув частоти залежить ще від геометричних співвідношень антенного пристрою і положення зондуючого пакета (рис.5, б). Градієнтні вимірювання у приземному шарі потребують точності $\sim 0,1 - 0,3$ °С, тому отримане значення f_d потрібно скоректувати з точністю 0,2 - 0,6%. До точності вимірювання амплітуди вимоги нижчі, але і діапазон її змін більший. Тому метою розв’язку дифракційної задачі поставлено отримання точних висотних залежностей $|u_{aux}|$ і f_d при заданому положенні і усіх розмірах антенного пристрою системи РАЗ. Геометричну схему задачі наведено на рис.6, на якому позначено: РА – радіоантени, АВ – акустичний випромінювач.

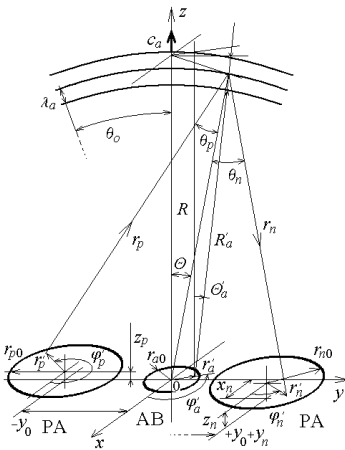


Рисунок 6 – Геометрична схема дифракційної задачі в бістатичних системах РАЗ

На початку аналізу подано оцінку можливості використання наближення дальньої зони. Показано, що дисперсія швидкості руху фазових фронтів хвиль на межі дальньої зони антен призведе до значної зміни зсуву частоти прийнятого сигналу, що обумовить

суттєву похибку при вимірюванні температури.

Попередній розв'язок задачі з використанням наближення точкових джерел, який дозволяє суттєве спрощення математичних виразів, показав ступінь значущості всіх фізичних факторів. Тобто, можна не враховувати зміну кута між фазовими фронтами акустичного електромагнітного полів та поляризаційними ефектами. З іншого боку сильний вплив має зміна розподілень збуджуючих полів уздовж осі бістатистики системи (вздовж осі y). Показано, що при цих спрощеннях вираз для $|u_{вих}|$ може бути зведено до аналітичної форми:

$$|u_{вих}(r)| = \frac{1 - 1,5(y_0 / R)^2}{R} \exp\left[-2(a \cdot y_0 / R)^2\right], \quad (3)$$

де a – коефіцієнт, пов'язаний з радіусами апертур, R і y_0 – згідно схеми, зображеної на рис.6.

Цей вираз якісно відповідає експериментальним даним, які отримано раніше у ПНДЛ ЗА ХІРЕ.

Найбільш точний розв'язок дифракційної задачі полягає у розкладанні полів усіх антен по просторових гармоніках, запису дифракції кожної гармоніки ЕМ поля на кожній гармоніці акустичного та подальшому збору поля відбитих гармонік на апертурі приймальної антени. Однак таке рішення дуже громіздке, а потужності сучасних ПК замало для проведення чисельного інтегрування таким шляхом. Її також замало для моделювання розподілу полів за допомогою сучасних чисельних методів та відомих програмних пакетів, які створені на підґрунті методу кінцевих елементів. Цьому заважає значна область, яку займають поля, та необхідність розв'язку у просторі трьох вимірів.

Суттєвого спрощення розв'язку можна досягнути, якщо використовувати функцію Гріна у вигляді $\frac{e^{-ikr}}{r}$, за допомогою якої описується поле в дальній зоні антен і в зоні Френеля. Однак можливість використання наближення Френеля необхідно довести не тільки для випромінюваних полів, але і для усього антенного пристрою системи РАЗ.

Нижня точка траси зондування R_w , з якої можна отримати сигнал (рис.5, б) визначається шириною ОПП радіоантен, відстанню між ними, енергетичними параметрами системи. Нескладні геометричні співвідношення показують, що точка дотику ОПП, при характерних для сучасних систем РАЗ параметрах, лежить в зоні Френеля. Для доведення можливості використання наближення Френеля на підставі співвідношень хвильової оптики для фокусуєчої системи проведено розрахунок поля відбитих ЕМХ поблизу фокусу при точковому неспрямованому джерелі (рис.7 а,б).

На цих рисунках наведено результати трьох варіантів розрахунку. Результати розрахунку, згідно з виразами поля у наближенні Фраунгофера

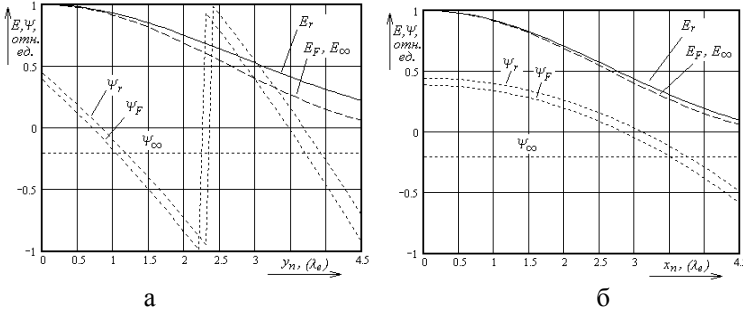


Рисунок 7 – ЭМП в області фокуса при $r_{a0} = 3\lambda_a$, $y_0 = 3,6r_{a0}$, $r_0 = R_w$

(криві, позначені індексом ∞), у наближенні Френеля (індекс F) і при розкладанні полів по просторовим гармонікам (індекс r). Подальші розрахунки при $r_{a0} > 3\lambda_a$ і $r_0 > R_w$ показали ще краще співпадання для другого і третього варіантів. Таким чином, попередній аналіз дозволив оцінити можливість використання наближень, вибрати шлях розв'язку задачі, включаючи етап чисельного інтегрування.

Математичне формулювання задачі враховує розподілення збудження апертур РА, які працюють на випромінювання та прийом $\dot{f}_p(\vec{r}'_p)$, $\dot{f}_n(\vec{r}'_n)$, акустичного випромінювача: $\dot{f}_a(\vec{r}'_a)$, а також просторових розподілень акустичного і ЕМ полів в області відбиття. Кінцевий вираз для комплексної амплітуди $\dot{u}_{вих}$ має вигляд:

$$\dot{u}_{вих} = \int_{S_a} \int_{S_p} \int_{S_n} \int_{S_0} \bar{K}_0(r_0, \theta, \varphi) \dot{f}_a(\vec{r}'_a) \dot{f}_p(\vec{r}'_p) \dot{f}_n(\vec{r}'_n) g_\Sigma(\theta) \dot{G}_\Sigma(r_p, r_n) ds_a ds_p ds_n d\bar{s}_0, \quad (4)$$

де $g_\Sigma(\theta)$ – функція, яка включає ДС елементів Гюйгенса усіх антен,

$$\dot{G}_\Sigma(r_p, r_n) = \frac{\exp[-ik_e r_p]}{r_p} \cdot \frac{\exp[-ik_e r_n]}{r_n} - \text{добуток функцій Гріна.}$$

$$\text{де } r_n \cong R - z_n \cos \theta - r'_n \sin \theta \cos(\varphi - \varphi'_n) - \sin \theta [x_n \cos \varphi + (y_0 + y_n) \sin \varphi] - \\ - r^{-1} r'_n \sin \theta [x_n \cos \varphi'_n + (y_0 + y_n) \sin \varphi'_n] + 0,5r^{-1} [z_n^2 + (y_0 + y_n)^2 + x_n^2] + \dots$$

Запис r_p відрізняється індексами і заміною знака при y_0 .

Структура кінцевого виразу в більшості співпала зі структурою виразу для моностатичної зони, відмінності були в складових покажчиків експонент. Для отримання чисельних результатів знадобилася подальша апроксимація полів усіх антен у зоні Френеля.

Для ілюстрації дії окремих факторів розглядалися модельні випадки при таких параметрах: радіус акустичного випромінювача (АВ) $r_{a0} = 5\lambda_a$, радіуси радіоантен (РА) $r_{e0} = 2r_{a0} = 5\lambda_e$, довжина зондуючого пакета $\Delta R = 7\lambda_e$, $R_w = 2,3r_{e0}^2$, $\theta_{\max} = 0,9r_{e0}^{-1}$, $y_0 = 1,8r_{e0}$, умова Брега виконана в зоні моностатичного наближення.

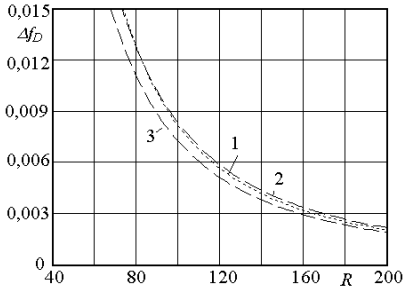


Рисунок 8 – Вплив фазового додатку

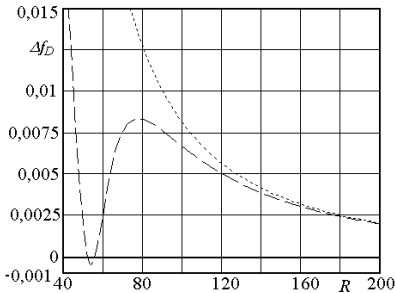


Рисунок 9 – Вплив перевероту фаз у бокових пелюстках

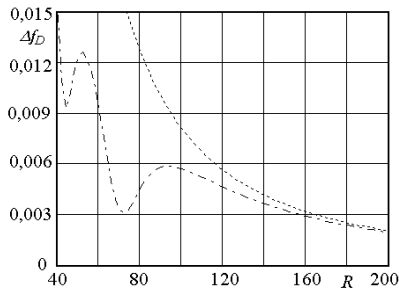


Рисунок 10 – Сумарна дія фізичних факторів

В ході аналізу найбільшу увагу приділено поведінці доплерівського зсуву частоти.

На рис.8 наведено вплив дисперсії швидкості руху хвильових фронтів. Отриманий результат відповідає фізичним уявленням. При врахуванні тільки зміни фази поля АХ додаток Δf_d буде більше нуля, (крива 2), а при врахуванні тільки змін фази ЕМХ – менше нуля (крива 3). Крива 1 – ідеалізована Δf_d , яка отримана для точкового відбивача, що рухається зі швидкістю C_a між напрямками головних максимумів ДС обох РА. Ця крива для порівняння залишена і на наступних графіках.

Наступний графік (рис.9) ілюструє вплив переходу фази ЕМП РА через нуль при входженні зондуючого пакету в область дотику головних пелюстків ДС РА.

Сумарну дію усіх фізичних факторів ілюструє графік на рис.10.

Поява першого мінімуму обумовлена поступовим входженням пакета АХ в область взаємодії ДС радіоантен. При обраних межах апроксимації на висотах $R < 40\lambda_e$ ця взаємодія відсутня.

Подальші розрахунки не виявили впливу інших фізичних факторів, у реальних системах РАЗ дія даних механізмів буде менш

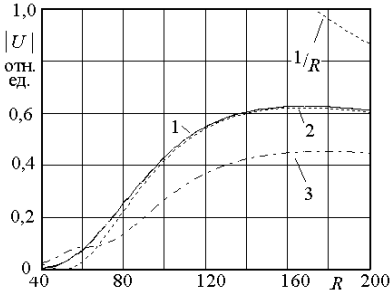


Рисунок 11 – Амплітудна функція

вираженою, тому що при розрахунках не враховувалась течія збуджуючих струмів за краї антен, вплив елементів конструкцій та ін.

Формування амплітудної функції взаємодії ілюструють графіки на рис.11.

Різниця амплітудних функцій для перших трьох випадків, для яких розраховано залежності Δf_D (рис.8), виявилась незначною, і виділити їх окремо в даному масштабі неможливо (крива 1).

Крива 2 розрахована сумісно з залежностями Δf_D , які показано на рис.9. Перший мінімум обумовлено дотиком перших нулів ДС РА. На результуючій кривій (3) осциляції зі збільшенням інтенсивності на початковій частині обумовлені взаємодією перших бокових пелюстків.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну задачу підвищення інформативності методів дистанційного зондування атмосферного граничного шару, які основані на використанні акустичних хвиль.

Серед основних результатів роботи потрібно виділити наступне.

1. На підставі аналізу вихідних співвідношень турбулентного потоку доказано необхідність урахування стискання середовища при оцінюванні загального рівня розсіяння звукових хвиль при АЗ АГШ, і що при оцінюванні флуктуацій доплерівського зсуву частоти необхідно розв'язувати задачу у просторі трьох вимірів, враховувати ДС антени содару і поперечні флуктуації руху повітря на усій трасі розповсюдження падаючого та відбитого полів. Це дає можливість уточнити зв'язки між характеристиками прийнятого сигналу і метеопараметрами АГШ.

2. Проведено аналіз руху зонduючого пакета акустичних хвиль у ламінарному потоці при стійкій стратифікації АГШ, дано оцінку фазовому зсуву прийнятого сигналу, що є основою для розробки методик вимірювання швидкості повітряних потоків при стійкому стані АГШ, а також обґрунтовує необхідність включення фазометрів у схеми приймальних пристроїв содарів.

3. Отримано вираз для спектра прийнятого сигналу АЗ, який враховує фізичні особливості акустичного зондування АГШ та є основою для розв'язку задач визначення температурних градієнтів в стійких шарах, і доводить можливість збільшення рівня прийнятого сигналу шляхом використання модульованих зонduючих посилок.

4. Під час аналізу дифракційної задачі розсіяння електромагнітних хвиль на неоднорідностях діелектричної проникливості повітря, які утворилися під час проходження акустичних хвиль в нижній частині траси зондування бістатичних систем РАЗ, обґрунтовано можливість використання наближення Френеля, завдяки чому отримано аналітичні вирази для прийнятого сигналу з цієї частини траси. Ці вирази дозволяють виключити методичну похибку метеовимірювань у нижній частині траси зондування, що дозволяє співставляти метеодані, що отримані приземними метеодавачами з даними РАЗ. Додатково в процесі аналізу отримано вимоги щодо конструкцій антенних пристроїв систем РАЗ.

Проведений аналіз дозволяє обґрунтувати перспективи подальшого удосконалення акустичних методів і систем дистанційного зондування атмосферного граничного шару.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Слипченко Н.И. К вопросу решения дифракционной задачи радиоакустического зондирования атмосферы бистатическими системами / Н.И. Слипченко, Лю Чан, А.Ю. Панченко // Материалы 21 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Т.2. Севастополь, 2011. – С. 1075–1076.
2. Слипченко Н.И. О допустимых упрощениях в дифракционной задаче на нижней границе бистатического РАЗ / Н.И. Слипченко, А.Ю. Панченко, Лю Чан // Радиотехника и Информатика, 2011, №2. – С. 25–29.
3. Слипченко Н.И. О постановке дифракционной задачи для бистатической зоны систем радиоакустического зондирования атмосферы / Н.И. Слипченко, А.Ю. Панченко, Лю Чан // Радиотехника, 2011, вып. 166. – С.228–232.
4. Панченко А.Ю. Представление принимаемого сигнала при бистатическом РАЗ в приближении Френеля / А.Ю. Панченко, Н.И. Слипченко, Лю Чан // Радиотехника, 2011, вып. 167. – С.59–65.
5. Slipchenko N, Liu Chang, Panchenko A. Diffraction problem for bistatic zone of radio acoustic sounding systems / Ню Slipchenko, Liu Chang, A. Panchenko // Proceedings of the International Conference on Antenna Theory and Techniques, «ICATT'11», Kyiv, Ukraine, 2011. – P. 112-114.
6. Слипченко Н.И. Анализ физических факторов, формирующих отраженный звуковой сигнал в АПС / Н.И. Слипченко, Лю Чан, А.Ю. Панченко // Сб. научн. трудов Четвертого Международного Радиоэлектронного Форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», т.1, часть 1. Харьков, 2011. – С. 105–108.

7. Панченко А.Ю. Физические аспекты формирования сигнала при ветровом содарном зондировании атмосферного пограничного слоя / А.Ю. Панченко, Н.И. Слипченко, Лю Чан // Радиотехника, 2012, вып.168. – С. 172–176.
8. Панченко А.Ю. Анализ спектральных компонент принимаемого сигнала при содарном зондировании устойчивого АПС / А.Ю. Панченко, Н.И. Слипченко, Лю Чан // Радиотехника, 2012, вып.169. – С. 106–109.
9. Панченко А.Ю., Слипченко Н.И., Лю Чан. Сравнение радиолокационных и акустических методов зондирования атмосферы / А.Ю. Панченко, Н.И. Слипченко, Лю Чан. // Материалы 22 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Т.2.Севастополь, 2012. – С. 1033–1034.
10. Лю Чан. Дифракционная задача РАЗ в бистатической зоне / Лю Чан // Сборник докладов VII региональной студенческой научно-практической конференции с международным участием «Молодежь и глобальные проблемы современности» Москва 2012. – С. 115–116.
11. Panchenko A. Analysis of physical factors forming the received signal at sodar sounding of ABL / A. Panchenko, N. Slipchenko, Liu Chang // Proceedings of the 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing ISARS-2012. Boulder, Colorado, 2012.
12. Слипченко Н.И. Анализ современных методов оценки метеоусловий для повышения эффективности солнечной энергетики / Н.И. Слипченко, А.Ю. Панченко, Лю Чан // Труды V-й Юбилейной Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники» Кацивели, 2-5 октября 2012. – С. 425–428.

Анотація

Лю Чан. Удосконалення моделей та методів радіоакустичного і акустичного зондування атмосферного граничного шару. – Рукопис.

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

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну задачу підвищення інформативності методів дистанційного зондування атмосферного граничного шару, які основані на використанні акустичних хвиль.

На підставі ретельного аналізу фізичних факторів сформульовано ряд нових задач методу акустичного зондування і обґрунтовано їх необхідність. Зокрема, для адекватної оцінки загального рівня розсіяння звукових хвиль при АЗ атмосферного граничного шару (АГШ) доказано необхідність урахування стиснення середовища.

Проведено аналіз руху зонduючого пакета акустичних хвиль у ламінарному потоці при стійкій стратифікації АГШ, на основі якого розроблено основи методики вимірювань швидкості ламінарних потоків і обґрунтовано необхідність включення фазометрів у схеми приймальних пристроїв содарів.

В ході аналізу дифракційної задачі розсіяння електромагнітних хвиль на неоднорідностях діелектричної проникливості повітря, що утворилися під час проходження акустичних хвиль у нижній частині траси бістатичних систем радіоакустичного зондування, обґрунтовано можливість використання наближення Френеля, завдяки чому отримано аналітичні вирази для прийнятого сигналу з цієї частини траси. Ці вирази дозволяють отримати розрахункові дані, на підставі яких можна проводити корекцію результатів вимірювань і виключити методичну похибку вимірювання метеопараметрів у нижній частині траси зондування.

Ключові слова: атмосферний граничний шар, содар, радіоакустичне зондування, дифракційні задачі, антена, зона Френеля, акустичні хвилі, електромагнітні хвилі, неоднорідне середовище, доплерівський зсув частоти.

Аннотация

Лю Чан. Совершенствование моделей и методов радиоакустического и акустического 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.

В диссертационной работе решена научно-практическая задача увеличения информативности методов дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя (АПС), основанных на использовании акустических волн.

На основании тщательного анализа физических факторов сформулирован ряд новых задач метода акустического зондирования (АЗ) и обоснована их необходимость. В частности, для адекватной оценки общего уровня рассеяния звуковых волн при АЗ АПС доказана необходимость учета сжимаемости среды. Детальное рассмотрение процесса формирования доплеровского сдвига частоты принимаемого эхо-сигнала показало, что при оценке его флуктуаций необходимо решать задачу в пространстве трех измерений, учитывать ДН антенны содара и поперечные флуктуации движения воздуха на трассе распространения акустических волн.

Проведен анализ движения зондирующего пакета акустических волн в ламінарном потоке при устойчивой стратифікації АПС, на основе которого разработаны основы методики измерения скорости ламінарных потоков и обоснована необходимость включения фазометров в схемы приемных устройств содаров. Получено выражение для спектра принимаемого эхо-сигнала, учитывающее физические особенности АПС,

на основании которого сделаны выводы, во-первых, о возможности постановки задач определения температурных градиентов в устойчивых слоях, и, во-вторых, о необходимости использования модулированных зондирующих сигналов.

При анализе дифракционной задачи рассеяния электромагнитных волн на неоднородностях диэлектрической проницаемости воздуха, образующихся при прохождении акустических волн на нижнем участке трассы бистатических систем радиоакустического зондирования (РАЗ), обоснована возможность использования приближения Френеля, благодаря чему получены аналитические выражения для принимаемого сигнала в зоне бистатического приближения. Эти выражения позволяют получить расчетные данные, на основании которых можно проводить коррекцию результатов измерений и исключить методическую погрешность измерения метеопараметров на нижнем участке трассы зондирования. Дополнительно в процессе анализа выработаны требования к конструкциям антенных устройств систем РАЗ.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, содар, радиоакустическое зондирование, дифракционные задачи, антенна, зона Френеля, акустические волны, электромагнитные волны, неоднородная среда, доплеровский сдвиг частоты.

Summary

Liu Chang. Perfection of models and methods for radio acoustic and acoustic sounding of atmospheric boundary layer. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of engineering sciences, specialty – 05.12.17 – radio engineering and television systems. – Kharkov National University of Radio Electronics.

Solution of a scientific and applied problem, making it possible to increase information methods for remote sounding of atmospheric boundary layer based on the use of acoustic waves, is presented in the given thesis.

A number of new acoustic sounding method problems are formulated on the basis of the physical factors through analysis and their necessity is substantiated. In particular, the need for the medium compression inclusion is substantiated for the adequate estimation of the general level of the sounding waves scattering at AS atmospheric boundary layer.

The analysis of the acoustic waves sounding packet motion in the laminar flow at the atmospheric boundary layer stable stratification was carried out, the foundations of the methods for the laminar flows were developed on this analysis basis and the necessity for including the phase meters into the circuit of the receiving sodar devices was substantiated.

At the analysis of the diffraction problem of the electromagnetic waves scattering on the air permittivity inhomogeneities being formed when acoustic waves pass in the low part of the route of the radio acoustic sounding bistatic

systems, the possibility to use Fresnel approximation is substantiated, due to this the analytical expressions for the received signal in the bistatic approximation are derived. These expressions make it possible to receive the calculation data, using them it is possible to carry out correction of the measurement results and exclude the systematic error of meteorological parameters measurement at the low part of the sounding route.

Key words: atmospheric boundary layer, sodar, radio acoustic sounding, diffraction tasks, antenna, Fresnel zone, acoustic waves, electromagnetic waves, inhomogeneities medium, Doppler frequency shift.

Підп. до друку 21.11.12.	Формат 60x84 1/16.	Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 1,2.	Облік. вид. арк. 1,1.	Тираж 100 прим.
Зам. №	Ціна договірна.	

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна 14

Віддруковано в навчально-науковому
Видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна 14